



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επίδραση της μεταβολής της στάθμης τεχνητής λίμνης στην
ευστάθεια των πρανών»**

Μαρία-Αγγελική Ραπτάκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Εμμανουήλ Στειακάκης, Αν. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Παντελής Λιόλιος, ΕΔΙΠ

Χανιά, 2023

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην εργασία εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την υπομονή του, την πολύτιμη βοήθειά του όποτε την χρειάστηκα, τις κατευθυντήριες γραμμές και τα ουσιαστικά σχόλια του.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον Καθηγητή Μιχαήλ Γαλετάκη και το μέλος ΕΔΙΠ Παντελή Λιόλιο, μέλη της εξεταστικής επιτροπής της εργασίας μου, για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας.

Ακόμα, ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Διονύση Βαβαδάκη για την υπομονή και την ανοχή του, την αμέριστη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε για την εκφραστική διαμόρφωση του τελικού κειμένου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν υλικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου που με ανέχτηκαν και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δημιουργία λιμνών συνιστά τον πιο συνηθισμένο τρόπο αποκατάστασης εκσκαφών λιγνιτωρυχείων μετά το πέρας της εκμετάλλευσης. Οι τεχνητές αυτές λίμνες είναι αισθητικά ελκυστικές και χρησιμοποιούνται κυρίως για ψυχαγωγικούς σκοπούς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να διερευνήσει την επίδραση της μεταβολής της στάθμης του νερού τεχνητής λίμνης στην ευστάθεια των πρανών. Ως πεδίο έρευνας χρησιμοποιήθηκε η τεχνητή λίμνη Most στην Τσεχία, η οποία προέκυψε από την πλήρωση εκσκαφών λιγνιτωρυχείων της περιοχής.

Η έρευνα, αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος RAFF (Risk Assessment of Final Pits During Flooding) με την συγχρηματοδότηση του Research Fund for Coal and Steel (RFCs) No-847299-RAFF.

Η ευστάθεια των πρανών της λίμνης διερευνήθηκε σε θέσεις, ακολουθώντας διάφορα σενάρια μεταβολής της στάθμης του νερού. Στα σενάρια αυτά λήφθηκε υπόψη το μοντέλο Van Genuchten για την εκτίμηση της επίδρασης της μύζησης στην διαπερατότητα των στρωμάτων στην ακόρεστη ζώνη. Επίσης, για την εκτίμηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς τους χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό μοντέλο Mohr – Coulomb.

Αρχικά, η πίεση του νερού των πόρων και η επίδραση της μύζησης στην ακόρεστη ζώνη εκτιμήθηκαν με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων SEEP/W. Στη συνέχεια, για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της οριακής ισορροπίας (μέθοδος Morgenstern-Price) και το λογισμικό SLOPE/W.

Από τα διάφορα σενάρια που επιλύθηκαν, προκύπτει ότι τα πρανή της λίμνης είναι ευσταθή. Όμως, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με την ταπείνωση της στάθμης της λίμνης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ταπείνωσης, τόσο μικρότερη εκτιμάται η ασφάλεια των πρανών.

Επίσης, η αυξομείωση (διακύμανση) της στάθμης του νερού της λίμνης μειώνει την ευστάθεια των πρανών, η οποία όμως δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των διακυμάνσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

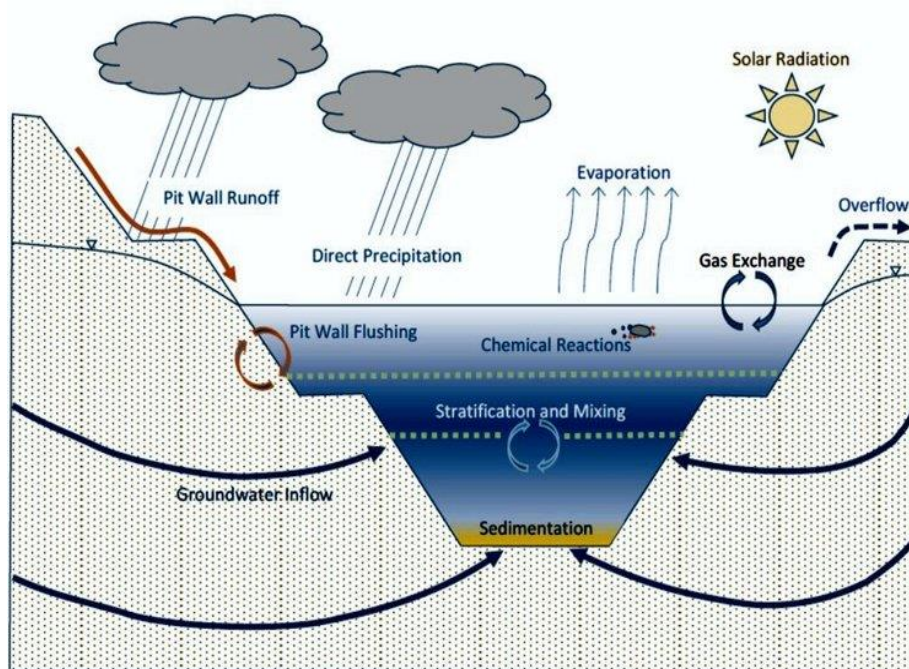
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	5
2.1. Κορεσμένα εδάφη	5
2.2. Μη κορεσμένα εδάφη	6
2.2.1. <i>Νόμος Darcy</i>	8
2.2.2. <i>Μοντέλο Van Genuchten και χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού</i>	10
2.3. Ανάλυση ροής με το λογισμικό SEEP/W.....	16
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ	19
3.1. Τύποι αστοχίας πρανών	19
3.1.1. <i>Εδαφικά πρανή</i>	19
3.1.2. <i>Βραχώδη πρανή</i>	22
3.2. Καταστατικά μοντέλα	25
3.2.1. <i>Μοντέλο Mohr – Coulomb (MC)</i>	25
3.2.2. <i>Μοντέλο Hardening Soil (HS)</i>	28
3.3. Ευστάθεια πρανών	30
3.3.1. <i>Αναλύσεις οριακής ισορροπίας</i>	31
3.3.2. <i>Μέθοδοι οριακής ισορροπίας</i>	34
3.3.3. <i>Μέθοδος των λωρίδων</i>	36
3.4. Ανάλυση ευστάθειας πρανών με το λογισμικό SLOPE	43
4. ΠΕΔΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ	45
4.2. Πλήρωση εκσκαφών με νερό και δημιουργία της λίμνης	47
4.3. Γεωλογία και λιθοστρωματογραφία της περιοχής	48

4.4. Υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή	56
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ MOST	58
5.1. Θεωρήσεις και παραδοχές	61
5.2. Κατανομή πίεσης του νερού των πόρων (SEEP/W)	62
5.2.1. Σχεδιασμός μοντέλου	62
5.2.2. Εισαγωγή υδραυλικών παραμέτρων	63
5.2.3. Αρχικές συνθήκες.....	68
5.2.4. Οριακές συνθήκες.....	69
5.3. Ανάλυση ευστάθειας πρανών (SLOPE/W).....	70
5.3.1. Σχεδιασμός μοντέλου και παράμετροι ανάλυσης.....	70
5.3.2. Εισαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων	72
5.3.3. Παράμετροι ανάλυσης.....	73
5.4. Επιλύσεις σταθερής ροής και αποτελέσματα	74
5.5. Επιλύσεις μεταβατικής ροής και αποτελέσματα	80
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η δημιουργία τεχνητών λιμνών (pit lakes) για ψυχαγωγικούς σκοπούς θεωρείται ως η πλέον περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδος αποκατάστασης ανοικτών εκσκαφών (π.χ. λιγνιτωρυχείων), των οποίων η λειτουργία έχει σταματήσει.

Τεχνητές λίμνες σε εκσκαφές ορυχείων (pit lakes) σχηματίζονται όταν σταματούν οι εργασίες εξόρυξης και τα εναπομείναντα κοιλάματα γεμίζουν με νερό (υπόγειο, επιφανειακό ή από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα) (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού ισοζυγίου τεχνητής λίμνης σε ανοικτή εκσκαφή (www.hydrogeologica.com/pit-lake-water-quality-risk-assess).

Η πλήρωσή τους με νερό γίνεται συνήθως με φυσικό τρόπο (από υπόγειο ή επιφανειακό νερό ή από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα) και ο χρόνος σταθεροποίησης της στάθμης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χρόνια έως πολλές δεκαετίες.

Το μέγεθος και το βάθος των λιμνών ποικίλλουν και σχετίζονται με την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών. Συνήθως οι λίμνες αυτές έχουν σχετικά επίπεδο πυθμένα και απότομα πρανή.

Σε πολλές από αυτές τις τεχνητές λίμνες αναπτύσσονται όξινες συνθήκες λόγω υψηλής συγκέντρωσης διαλυμένων μετάλλων. Οι προσεγγίσεις για την βελτίωση της ποιότητας του νερού περιλαμβάνουν την προσθήκη ασβέστη ή άλλων αλκαλικών υλικών και τη διέγερση βακτηρίων που μειώνουν τα θειικά ιόντα (Castro and Moore, 2000).

Ωστόσο, προτιμάται η πρόληψη και όχι η αποκατάσταση. Μέτρα για την πρόληψη της οξείδωσης των αποβλήτων εξόρυξης και των πετρωμάτων στα μέτωπα εξόρυξης, όπως και για την γρήγορη πλήρωση των εκσκαφών με νερό για την αναστολή της δραστηριότητας των βακτηριδίων οξείδωσης του οξειδίου του θείου και την προώθηση ανοξικών συνθηκών στους πυθμένες της λίμνης, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το σχηματισμό οξέων (Castro and Moore, 2000).

Ο χρόνος ζωής και γενικότερα η βιωσιμότητα των λιμνών αυτών συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την ποιότητα του νερού, αλλά και την ευστάθεια των πρανών τους. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζονται κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες και ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.

Η ευστάθεια των πρανών μιας τεχνητής λίμνης επηρεάζεται σαφώς από τον κύκλο του νερού (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, εξατμισοδιαπνοή, κατείσδυση, επιφανειακή απορροή), τις ειροές και εκροές που έχουν ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της στάθμης και ως εκ τούτου, μεταβολή στην πληρότητα της λίμνης και στην υδροπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών (μεταβολή της ακόρεστης ζώνης) (Xia, 2014). Τυχόν κλιματικές αλλαγές πιθανόν να δημιουργήσουν ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα.

Στην διαδικασία ανάλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς των κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του κορεσμού και της ροής των υπόγειων υδάτων στην παραμόρφωση τους. Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών περιγράφεται από τον συνδυασμό εξισώσεων μετατόπισης και πίεσης του νερού των πόρων (Josifoski and Lenart, 2016).

Στην προσομοίωση της κινητικής συμπεριφοράς χρησιμοποιούνται τα καταστατικά μοντέλα Mohr Coulomb, Hardening Soil model κ.α. σε συνδυασμό με διάφορες θεωρήσεις (στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες, υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten κ.ά.).

Αξιολογώντας τα παραπάνω, η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση της μεταβολής της στάθμης του νερού στην ευστάθεια των πρανών της τεχνητής λίμνης Most στην Τσεχία. Για τον σκοπό αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

Αρχικά, περιγράφεται η ροή του υπόγειου νερού στα εδαφικά στρώματα και πως αυτή επηρεάζει την κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων σ'αυτά. Γίνεται ειδική αναφορά στην ροή του νερού στα ακόρεστα στρώματα και παρουσιάζεται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων SEEP/W της εταιρείας GEO-SLOPE International Ltd.

Ακολούθως, αναλύονται οι μέθοδοι εκτίμησης της ασφάλειας πρανών. Γίνεται ειδική αναφορά στις μεθόδους οριακής ισορροπίας και την εφαρμογή τους με το λογισμικό SLOPE/W της εταιρείας GEO-SLOPE International Ltd.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η μορφολογία, η γεωλογία – λιθοστρωματογραφία, οι κλιματικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της μελετώμενης περιοχής. Επίσης, αξιολογούνται δεδομένα και παρατηρήσεις ερευνών και θεωρούνται υδραυλικές και γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών των πρανών της λίμνης.

Στη συνέχεια, διατυπώνονται σενάρια μεταβολής της στάθμης της λίμνης Most και εξετάζεται η ευστάθεια των πρανών, σε τρεις επιλεγμένες θέσεις, σε δύο βήματα:

- Αρχικά εκτιμήθηκε η κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων στα εδαφικά στρώματα με το λογισμικό SEEP/W. Χρησιμοποιείται το μοντέλο Van Genuchten που θεωρεί την χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους (SWCC) για να περιγράψει την μύζηση στην ακόρεστη ζώνη και ως εκ τούτου την μεταβολή της υδροπερατότητας σε σχέση με τον βαθμό κορεσμού.
- Ακολούθως πραγματοποιείται η ανάλυση ευστάθειας πρανών με το λογισμικό SLOPE/W. Θεωρήθηκε ότι ισχύει το καταστατικό μοντέλο ελαστοπλαστικής

συμπεριφοράς Mohr – Coulomb και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της μεθόδου Morgenstern-Price.

2. ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

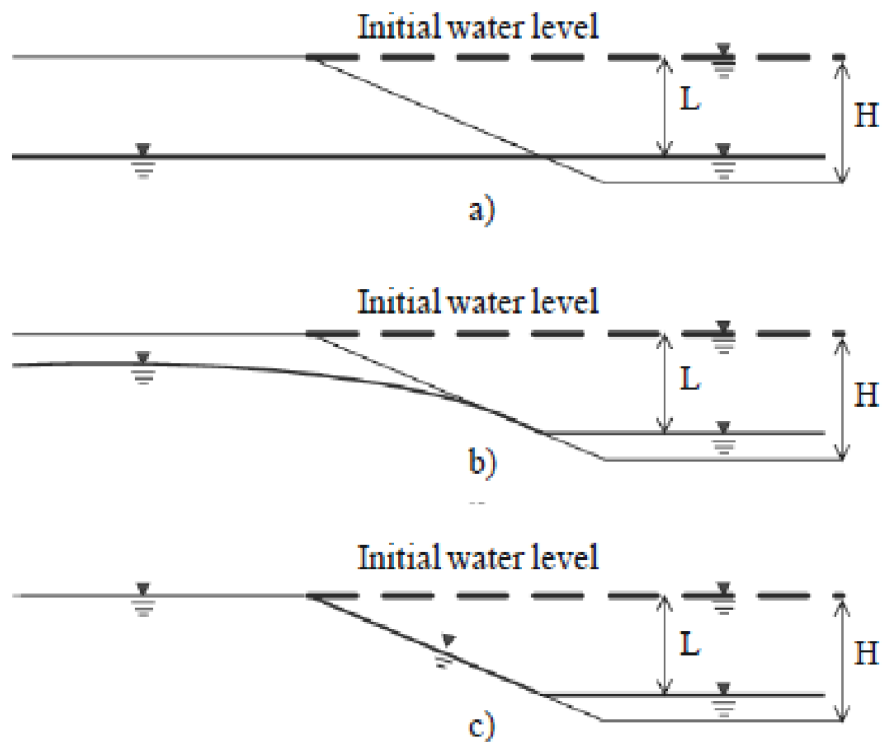
Η ροή του υπόγειου νερού μελετάται με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τον βαθμό κορεσμού του εκάστοτε εδαφικού στρώματος.

2.1. Κορεσμένα εδάφη

Σύμφωνα με τους Lopez – Acosta et al. (2013) η κίνηση του νερού λόγω μεταβολής της στάθμης της λίμνης και διατηρώντας σταθερή την πιεζομετρική επιφάνεια στο πρανές, μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας: α) κατάσταση αργής μεταβολής της στάθμης της λίμνης (Drained), b) μεταβατική κατάσταση ροής – παραμόρφωσης (Fully Coupled Flow deformation), και c) κατάσταση γρήγορης μεταβολής της στάθμης της λίμνης (Undrained). Οι καταστάσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.

Στην περίπτωση της αργής μεταβολής της στάθμης το έδαφος θεωρείται ότι αποστραγγίζεται ταυτόχρονα με την ταπείνωση της στάθμης της λίμνης. Σε κάθε μεταβολή της στάθμης, η πιεζομετρία στο πρανές ταυτίζεται με τη στάθμη του νερού. Έτσι δημιουργείται μια σταθερή κατάσταση ροής (Σχήμα 2.1a). Σε αυτήν την περίπτωση δεν αναπτύσσεται μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων, συνεπώς ούτε παραμόρφωση.

Στην περίπτωση μεταβολής της στάθμης της λίμνης, η κατάσταση μεταβολής της στάθμης δημιουργεί μια σχέση ροής – παραμόρφωσης (fully coupled flow deformation), και προκύπτει μια καμπυλόγραμμη πιεζομετρική επιφάνεια εντός του εδαφικού πρανού, η θέση της οποίας εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής της στάθμης της λίμνης και τις ιδιότητες του υλικού (όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες κ.λπ.) (Σχήμα 2.1b). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της πίεσης του νερού πόρων με το χρόνο, αλλά και την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί το νερό.



Σχήμα 2.1: Μεταβολή της στάθμης της λίμνης: a) αργή μεταβολή της στάθμης, b) συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής, c) γρήγορη μεταβολή της στάθμης (López-Acosta, 2013).

Στην περίπτωση γρήγορης μεταβολής της στάθμης της λίμνης, το έδαφος θεωρητικά δεν στραγγίζει και η στάθμη του νερού στο πρανές διατηρείται στο αρχικό επίπεδο (Σχήμα 2.1c). Συνεπώς, η πίεση του νερού των πόρων στο έδαφος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο του πρανούς από το νερό της λίμνης. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη μόνο η αλλαγή της πίεσης του νερού των πόρων λόγω μεταβολής των τάσεων, οι οποίες σχετίζονται με τη μεταβολή της στάθμης του νερού. Η μεταβολή του σχήματος της πιεζομετρικής επιφάνειας εντός του πρανούς είναι ελάχιστη λόγω του γρήγορου ρυθμού μεταβολής της στάθμης (López-Acosta, 2013).

2.2. Μη κορεσμένα εδάφη

Η ροή του νερού σε ακόρεστες ζώνες σχετίζεται με τη συνολική μύζηση (S_t), δηλαδή το άθροισμα της ελκτικής (S) και της οσμωτικής μύζησης (π) (Plaxis από Συλλιγνάκης, 2022):

$$S_t = S + \pi \quad [2.1]$$

Εντούτοις, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, δεν αναπτύσσεται οσμωτική μύζηση και ως εκτούτου:

$$S_t = S \quad [2.2]$$

Η ελκτική μύζηση S (ή απλώς μύζηση, ψ) σχετίζεται με το σκελετό του εδάφους (δυνάμεις προσρόφησης και τριχοειδείς δυνάμεις) και προσδιορίζεται από τη διαφορά μεταξύ της πίεσης του αέρα και της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους:

$$S = p_a - p_w \quad [2.3]$$

όπου, p_w και p_a οι πιέσεις του νερού και του αέρα των πόρων, αντίστοιχα.

Συνήθως, η πίεση του αέρα των πόρων είναι σταθερή και αρκετά μικρή ώστε να θεωρείται αμελητέα. Οι εξισώσεις που διέπουν την εφαρμογή των τάσεων βασίζονται στις ολικές πιέσεις ακολουθώντας τη θεωρία του Biot (1941), η οποία βασίζεται στη θεωρία των μικρών παραμορφώσεων και λαμβάνει υπόψη το νόμο του Darcy για τη ροή του νερού. Οι ενεργές τάσεις του Bishop (Bishop and Blight, 1963) δίνονται από τη σχέση 2.4, θεωρώντας τις συμπιεστικές τάσεις αρνητικές (Συλλιγνάκης, 2022).

$$\sigma = \sigma' + m \cdot (x \cdot p_w + (1 - x) \cdot p_a) \quad [2.4]$$

όπου,

σ η ολική τάση,

σ' η ενεργή τάση, και

m η μύζηση.

Ο συντελεστής μύζησης x , προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού, το πορώδες και την ελκτική μύζηση ($p_a - p_w$) (Bishop and Blight, 1963, Bolzon et al., 1996). Επειδή συνήθως τα πειραματικά στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, θεωρείται ίσος με τον ενεργό βαθμό κορεσμού S_e .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος $x = 1$, η εξίσωση ενεργών τάσεων γίνεται (Plaxis από Συλλιγνάκης, 2022):

$$\sigma = \sigma' + m \cdot p_w \quad [2.5]$$

και για ένα πλήρως ξηρό έδαφος ($x = 0$):

$$\sigma = \sigma' + m \cdot p_a \quad [2.6]$$

Θεωρώντας ότι η πίεση του αέρα των πόρων είναι σταθερή ή αρκετά μικρή ώστε να μην ληφθεί υπόψη (δηλαδή, $p_a \approx 0$), για ένα εντελώς ξηρό έδαφος, οι ενεργές και ολικές τάσεις είναι ουσιαστικά ίσες.

Από τα παραπάνω η εξίσωση ενεργών τάσεων, θεωρώντας $x = S_e$, μπορεί να γραφεί ως:

$$\sigma = \sigma' + m \cdot S_e \cdot p_w \quad [2.7]$$

όπου, S_e ο κορεσμός συναρτήσει της πίεσης πόρων λόγω μύζησης.

2.2.1. Νόμος Darcy

Ο νόμος του Darcy χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την ροή του νερού σε ένα κορεσμένο έδαφος. Σύμφωνα με αυτόν το νόμο, ο ρυθμός ροής του νερού μέσω μιας εδαφικής μάζας εξαρτάται από την υδραυλική κλίση και περιγράφεται από την σχέση 2.8

$$q = k \cdot i \quad [2.8]$$

όπου,

q ειδική παροχή,

k υδραυλική αγωγιμότητα, και

i υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy προέκυψε αρχικά για κορεσμένα εδάφη, αλλά μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στη ροή του νερού μέσα από ακόρεστο έδαφος. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε ακόρεστες συνθήκες, η υδραυλική αγωγιμότητα δεν

είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε νερό και έμμεσα με τις αλλαγές της πίεση του νερού των πόρων.

Ο νόμος του Darcy συχνά εκφράζεται ως εξής:

$$v = ki \quad [2.9]$$

όπου, v η ταχύτητα του Darcy.

Να σημειωθεί ότι η πραγματική μέση ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό μέσα στο έδαφος είναι η γραμμική ταχύτητα, που ισούται με την ταχύτητα του Darcy διαιρεμένη με το πορώδες. Στο ακόρεστο έδαφος, είναι ίση με την ταχύτητα Darcy διαιρεμένη με την ογκομετρική υγρασία του εδάφους. Οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από το SEEP/W βασίζονται μόνο στην ταχύτητα του Darcy.

Η γενική διαφορική εξίσωση που διέπει τη δισδιάστατη ροή, όπως την εφαρμόζει το SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2015) μπορεί να είναι εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad [2.10]$$

όπου,

H στάθμη του νερού,

k_x υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα x ,

k_y υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα y ,

Q οριακή ροή,

θ ογκομετρική υγρασία, και

t χρόνος.

Επίσης, η διαπερατότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) K του πορώδους μέσου δίδεται από την σχέση:

$$K = \frac{k \cdot \mu}{\rho_w \cdot g} \quad [2.11]$$

όπου,

ρ_w η πυκνότητα του νερού, και

k ο συντελεστής διαπερατότητας (m/sec), ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$k = k_{rel} \cdot k_{sat} \quad [2.12]$$

όπου,

k_{rel} η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα, και

k_{sat} η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

2.2.2. Μοντέλο Van Genuchten και χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού

Η συνολική μάζα του νερού που μπορεί να συγκεντρωθεί σε κάθε επιμέρους τμήμα του εδάφους είναι (Song, 1990):

$$m = \rho_w \cdot n \cdot S \quad [2.13]$$

όπου,

m η μάζα του νερού

ρ_w η πυκνότητα του νερού,

n το πορώδες, και

S ο βαθμός κορεσμού.

Η εξίσωση συνέχειας (αρχή διατήρησης μάζας) δείχνει ότι η εκροή νερού από όγκο του εδάφους είναι ανάλογη με τις αλλαγές στη συγκέντρωση της μάζας του νερού (απόκλιση της πυκνότητας ροής του εναπομείναντος νερού)

Έτσι, η εξίσωση συνέχειας έχει τη μορφή (Song, 1990):

$$\nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = -\frac{\theta}{\theta_t} \cdot (\rho_w \cdot n \cdot S) \quad [2.14]$$

Παραγωγίζοντας την δεξιά πλευρά της εξίσωσης 2.14 ως προς τον χρόνο:

$$-\frac{\theta}{\theta_t}(\rho_w \cdot n \cdot S) = -n \cdot S \cdot \frac{\theta \cdot \rho_w}{\theta_t} - \rho_w \cdot n \cdot \frac{\theta_s}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \frac{\theta_n}{\theta_t} \quad [2.15]$$

Από τον συνδυασμό των σχέσεων 2.14 και 2.15, προκύπτει η τελική εξίσωση συνέχειας, ως εξής (Song, 1990):

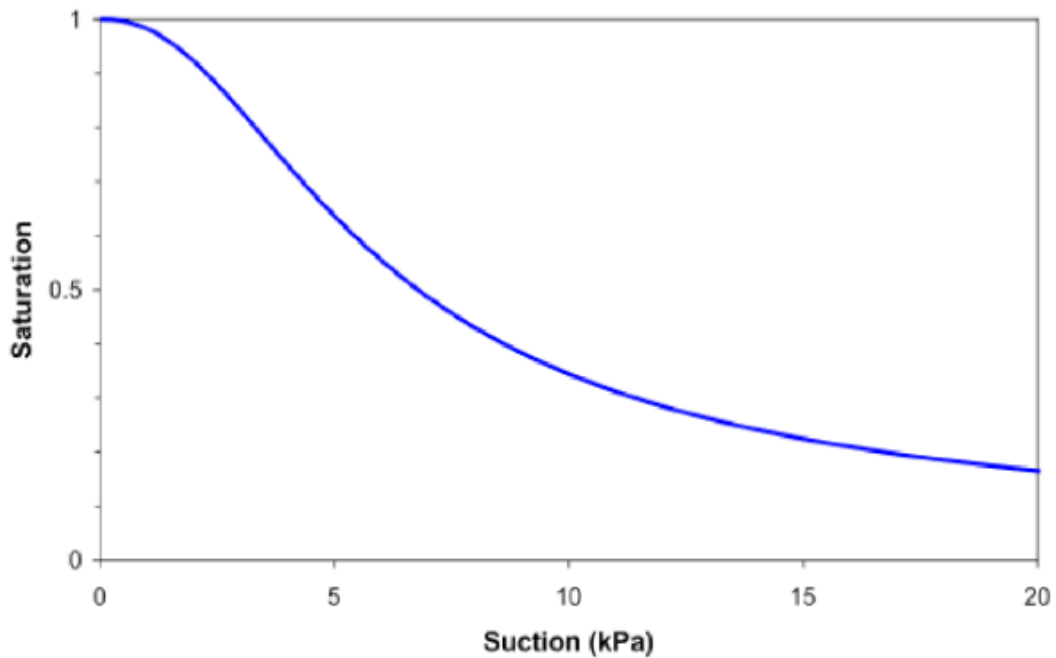
$$\rho_w \cdot S \cdot m^T \cdot \frac{\theta_s}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \left(\frac{n}{K_w} + \frac{(1-n)}{K_s} \right) \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} + n \cdot \rho_w \cdot \frac{\theta_s}{\theta \cdot p_w} \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} + \nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = 0 \quad [2.16]$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την συνολική συμπίεση του εδάφους λόγω των ενεργών τάσεων και της πίεσης των πόρων. Με τον δεύτερο όρο εκφράζεται η συμπίεση των στερεών σωματιδίων του σκελετού του εδάφους, καθώς και οι αλλαγές στην πυκνότητα του νερού, λαμβάνοντας υπόψη την συμπιεστότητα αέρα – νερού ($\beta=1/K_w$). Ο τρίτος όρος εκφράζει αλλαγές στον βαθμό κορεσμού λόγω ροής, ενώ ο τέταρτος την απόκλιση της μάζας του νερού στην ροή του εναπομείναντος νερού.

Η αρχική σχέση μύζησης – κορεσμού του εδάφους καθορίζεται από την αρχική θέση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, τα εδαφικά στρώματα με διαφορετική υδραυλική συμπεριφορά και τους κλιματικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η βροχόπτωση.

Στο υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten, για να περιγραφούν οι παράμετροι ροής στην ακόρεστη ζώνη, χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους SWCC (Galani, 2010).

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού καθορίζει τη σχέση του ποσοστού υγρασίας κατ' όγκο με τη μύζηση στο ακόρεστο έδαφος (βλέπε Σχήμα 2.2). Χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού προσδιορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι που περιγράφουν την υδραυλική συμπεριφορά των μερικώς κορεσμένων εδαφών (Συλλινγάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού στο μοντέλο Van Genuchten (Galani, 2010).

Η συνάρτηση Van Genuchten (1980) αποτελεί μια εξίσωση τριών παραμέτρων, η οποία συνδέει το βαθμό κορεσμού S με την μύζηση, ψ (Γάκης, 2011):

$$S = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \cdot [1 + (g_a \cdot |\psi|^{g_n})]^{g_c} \quad [2.19]$$

όπου,

$$\psi = -\frac{p_w}{\gamma_w} \quad [2.20]$$

p_w η πίεση του νερού που αναπτύσσεται στους πόρους,

γ_w το μοναδιαίο βάρος του νερού,

S_{res} ο παραμένων βαθμός κορεσμού του εδάφους, (ακόμη και σε υψηλά επίπεδα μύζησης),

S_{sat} ο βαθμός κορεσμού σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες $S_{sat} = 1$. Στην πραγματικότητα οι πόροι δεν είναι εντελώς γεμάτοι με νερό, αφού αέρας μπορεί να παγιδευτεί και έτσι ο κορεσμός μπορεί να είναι μικρότερος από 1,

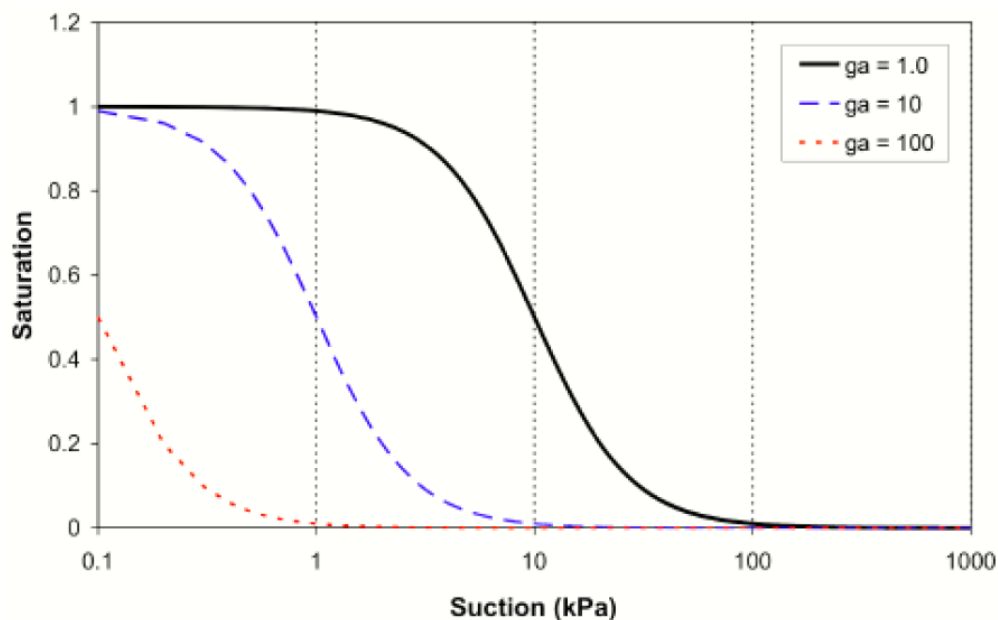
g_a παράμετρος προσαρμογής, η οποία σχετίζεται με την τιμή εισόδου αέρα (air entry value) στο έδαφος,

g_n παράμετρος προσαρμογής, που είναι συνάρτηση του ρυθμού εκροής του νερού από το έδαφος μετά την τιμή εισόδου αέρα, όταν δηλαδή η μύζηση συνεχίζει να αυξάνει μετά από αυτή την τιμή,

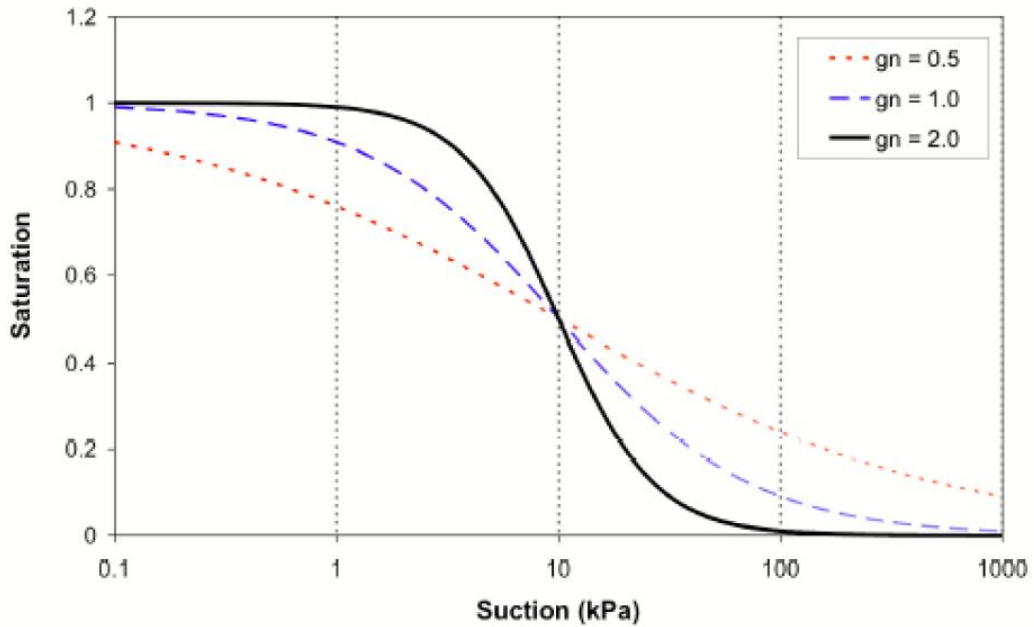
$g_c = \frac{(1-g_n)}{g_n}$ μια παράμετρος προσαρμογής της καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα (μετρήσεις) η οποία χρησιμοποιείται στην γενική εξίσωση Van Genuchten.

Τα Σχήματα 2.3 και 2.4 δείχνουν της επίδραση του g_a και του g_n αντίστοιχα στο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Η συνάρτηση Van Genuchten δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για χαμηλές και ενδιάμεσες τιμές μύζησης. Για υψηλές τιμές μύζησης ο κορεσμός προσεγγίζει τον παραμένοντα κορεσμό S_{res} (Συλλινγάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).



Σχήμα 2.3: Επίδραση του g_a στο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης (Galani, 2010).



Σχήμα 2.4: Επίδραση του g_n στο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης (Galani, 2010).

Η υδροπερατότητα εξαρτάται από τον κορεσμό του εδάφους. Ως σχετική διαπερατότητα k_{rel} ορίζεται ο λόγος της υδροπερατότητας σε δεδομένο βαθμό κορεσμού (k) σε σχέση με την διαπερατότητα σε κορεσμένες συνθήκες (k_{sat}) (Galani, 2010):

$$k_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} \quad [2.21]$$

Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού (βλέπε Σχήμα 2.5) ως συνάρτηση του ενεργού ποσοστού κορεσμού, S_{eff} , που ορίζεται από την σχέση:

$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}} \quad \text{ή} \quad S_{eff} = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad [2.22]$$

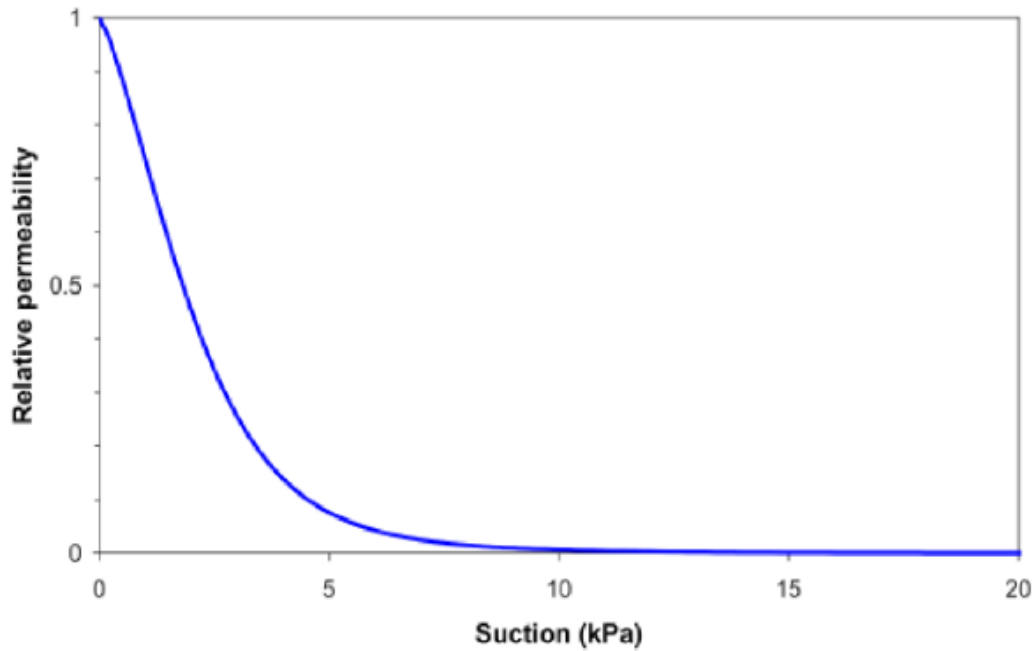
όπου,

S ένα δεδομένο ποσοστό κορεσμού,

θ_{res} η παραμένουσα ογκομετρική υγρασία και

θ_{sat} η ογκομετρική υγρασία σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες.

Σύμφωνα με τον Van Genuchten, η σχετική διαπερατότητα ορίζεται ως:



Σχήμα 2.5: Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας σε συνάρτηση της μύζησης στο μοντέλο Van Genuchten (Galavi, 2010).

$$k_{rel} = \max \left[(S_{eff})^{g_l} \left(1 - \left[1 - S_{eff}^{\left(\frac{g_n}{g_n-1} \right)} \right]^{\frac{g_n-1}{g_n}} \right)^2, 10^{-4} \right] \quad [2.23]$$

Χρησιμοποιώντας την παράγωγο του βαθμού κορεσμού σε σχέση με την μύζηση επιτυγχάνεται η συσχέτιση της σχετικής διαπερατότητας με την πίεση του νερού των πόρων (μύζηση), η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial S(p_w)}{\partial p_w} = (S_{sat} - S_{res}) \cdot \left[\frac{1-g_n}{g_n} \right] \cdot \left[g_n \cdot \left(\frac{g_a}{\gamma_w} \right)^{g_n} \cdot (p_w)^{g_n-1} \right] \cdot \left[1 + \left(g_a \cdot \left(\frac{p_w}{\gamma_w} \right)^{\left(\frac{1-2 \cdot g_n}{g_n} \right)} \right) \right] \quad [2.24]$$

Χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού και τις παραμέτρους της κορεσμένης διατμητικής αντοχής, οι Fredlund et al (1996) και Vanapalli et al (1996), ανέπτυξαν απλές εξισώσεις για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής ακόρεστων εδαφών.

Το SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2015) εφαρμόζει την ακόλουθη εξίσωση που προτάθηκε από τους Vanapalli et al (1996):

$$s = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \right] \quad [2.25]$$

όπου,

θ_w ογκομετρική υγρασία,

θ_s κορεσμένη ογκομετρική υγρασία, και

θ_r υπολειπόμενη ογκομετρική υγρασία, για την οποία η αντοχή του εδάφους στην μύζηση μηδενίζεται.

Το SLOPE/W θέτει ως προεπιλεγμένη τιμή της θ_r το 50% της κορεσμένης ογκομετρικής υγρασίας, αλλά ανάλογα με το υλικό, μπορεί να εισαχθεί οποιαδήποτε διαφορετική τιμή.

2.3. Ανάλυση ροής με το λογισμικό SEEP/W

Το SEEP/W είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από την GEO-SLOPE International Ltd για την ανάλυση της ροής των υπόγειων νερών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιείται στη γεωτεχνική μηχανική και την υδρογεωλογία για την αξιολόγηση των πιθανών προβλημάτων διαρροής και διήθησης σε διάφορες κατασκευές, όπως φράγματα, επιχώματα, εκσκαφές και σήραγγες.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μηχανικής με τη διαίρεση του πεδίου σε τμήματα που ονομάζονται στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του πεδίου.

Η συμπεριφορά κάθε τμήματος περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση από γραμμικό σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.

Όσον αφορά την κίνηση του νερού, το SEEP/W επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν τη ροή σε συνθήκες σταθερής και μεταβατικής κατάστασης. Μπορεί να

λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, οι οριακές συνθήκες και οι ιδιότητες των υλικών. Το πρόγραμμα παρέχει εργαλεία για τη δημιουργία καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, τον ορισμό ιδιοτήτων υλικών, τον καθορισμό οριακών συνθηκών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το SEEP/W ενσωματώνει προηγμένους αλγορίθμους για τον χειρισμό σύνθετων σεναρίων, όπως της στρωσιγένειας της ανισοτροπίας και της ετερογένειας. Μπορεί επίσης να λάβει υπόψη τις χρονικά εξαρτώμενες αλλαγές στις οριακές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις και οι διακυμάνσεις της στάθμης των υπόγειων υδάτων, για να αξιολογήσει τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του συστήματος.

Για την ανάλυση σε μεταβατικές συνθήκες ροής στο SEEP/W ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

- Καθορισμός γεωμετρίας και ιδιοτήτων του πορώδους μέσου, συμπεριλαμβανομένων των εδαφικών στρωμάτων, των διεπιφανειών και δομικών στοιχείων. Καθορίζονται επίσης οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η διαπερατότητα, το πορώδες και η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία.
- Καθορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών. Καθορίζεται η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία ή η κατανομή του υδραυλικού φορτίου στο έδαφος. Επιπλέον, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες.
- Καθορισμός βασικών εξισώσεων. Το SEEP/W επιλύει την εξίσωση ροής του υπόγειου νερού σε πορώδη μέσα. Η εξίσωση αυτή λαμβάνει υπόψη την υδραυλική αγωγιμότητα, την περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους και την υδραυλική κλίση.
- Εφαρμογή χρονικά εξαρτώμενων εισροών όπως η βροχόπτωση, οι αλλαγές της στάθμης του νερού ή οι αλλαγές στις οριακές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.
- Επίλυση. Το SEEP/W επιλύει αριθμητικά το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της μεταβατικής ροής του νερού συναρτήσει του χρόνου. Το λογισμικό υπολογίζει τα υδραυλικά φορτία, την πίεση του νερού των πόρων και την ροή σε διάφορες θέσεις στο πεδίο.

- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της μεταβατικής ανάλυσης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές στη ροή του νερού, τις πιέσεις νερού πόρων και την περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους με την πάροδο του χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ευστάθειας των γεωτεχνικών κατασκευών, την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων αποστράγγισης και τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων, όπως υπερβολικές πιέσεις πόρων ή πιθανή διαρροή.

Το λογισμικό SEEP/W εξάγει διάφορα γραφικά και αριθμητικά αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένων του δικτύου ροής, της πιεζομετρικής επιφάνειας, του ρυθμού ροής, της κατανομής της πίεσης πόρων και της υδραυλικής κλίσης.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η λειτουργία των τεχνητών λιμνών που δημιουργούνται σε ανοιχτές εκσκαφές, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ευστάθεια των πρανών τους.

3.1. Τύποι αστοχίας πρανών

Η κινητική συμπεριφορά ενός εδαφικού πρανού εξαρτάται κυρίως από την γεωμετρία, τις ιδιότητες του εδάφους και τις τασικές συνθήκες. Η όποια μεταβολή των παραγόντων αυτών μπορεί να μεταβάλει τις δυνάμεις που ενεργούν εντός της εδαφικής μάζας (δυνάμεις κίνησης, δυνάμεις αντίστασης και πιέσεις του νερού των πόρων), γεγονός που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση της μάζας πάνω σε μια επιφάνεια ολίσθησης και έτσι να προκληθεί αστάθεια του πρανού (Johanson and Edeskar, 2014).

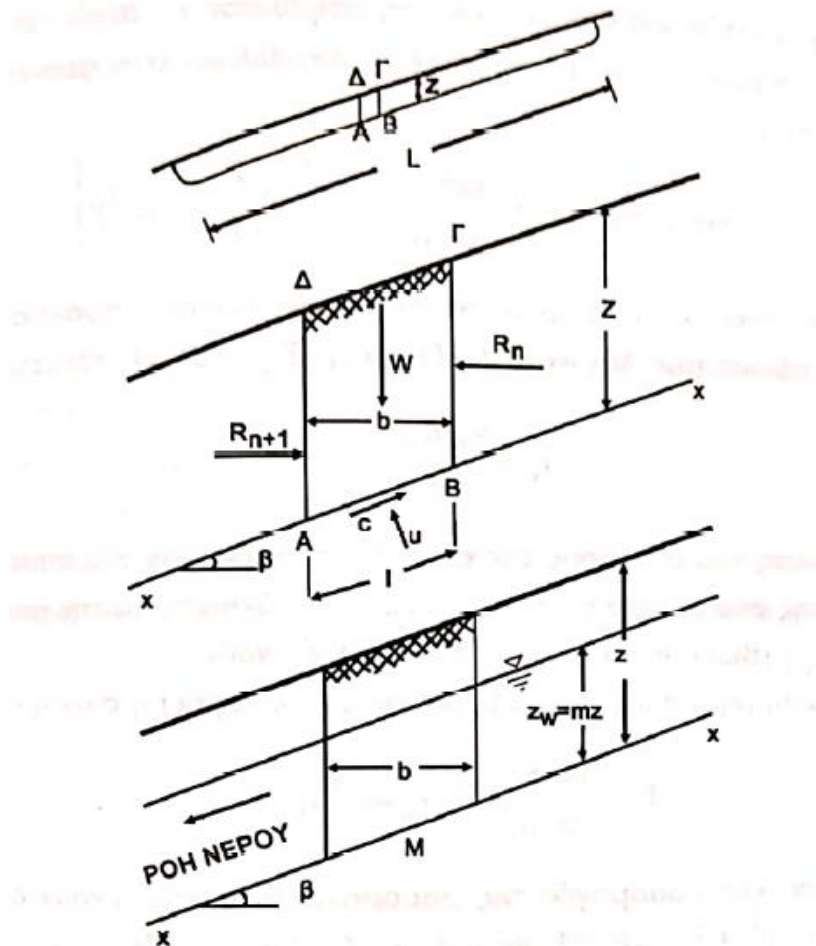
3.1.1. Εδαφικά πρανή

Οι κυριότερες μορφές αστοχίας εδαφικών πρανών είναι οι παρακάτω:

Επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης σχεδόν παράλληλη στο φυσικό έδαφος – πρανές απείρου μήκους (infinite slope)

Είναι ολισθήσεις που συνήθως εμφανίζονται σε ήπια γενικά πρανή (ακόμα και με κλίση μικρότερη των 15°) και μπορούν να ταξινομηθούν σαν αβαθείς μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides). Οι συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό τέτοιων ολισθήσεων είναι συνήθως η ύπαρξη ενός χαλαρού επιφανειακού εδαφικού στρώματος μικρού πάχους (π.χ. ζώνη αποσάθρωσης φλύσχη).

Η ανάλυση προϋποθέτει επιφάνεια ολίσθησης επίπεδη, παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους, με λόγο βάθους ολίσθησης (z) προς μήκος (L) πολύ μικρό, ενώ οι επιδράσεις (τριβές κ.λπ.) στα άκρα δεν λαμβάνονται υπόψη (Σχήμα 3.1) (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Σχήμα 3.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς απείρου μήκους με επιφάνεια ολίσθησης παράλληλη στην επιφάνεια εδάφους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Μερικές πρακτικές εφαρμογές της παραπάνω ανάλυσης έχουν δοθεί από τους Hutchinson (1961) και Skempton and Hutchinson (1969), ενώ στον Ελληνικό χώρο από τους Christoulas et al. (1989) για τη ζώνη αποσάθρωσης του φλύσχη, όπου η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας είναι πολύ συνηθισμένη και παρατηρείται κατά τις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων.

Ο συντελεστής ασφαλείας (F) δίνεται από τη σχέση των Skempton and Delory (1957), η οποία ακολουθεί το μοντέλο Mohr - Coulomb:

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)Z \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad [3.1]$$

όπου,

β γωνία κλίσης πρανούς.

$$F = \frac{2c' + \gamma H \left[\frac{\sin(i - \beta)}{\sin i} \right] \cos \beta \tan \phi'}{\gamma H \left[\frac{\sin(i - \beta)}{\sin i} \right] \sin \beta} \quad [3.2]$$

όπου:

c', ϕ' παράμετροι διατμητικής αντοχής σε ενεργές τάσεις,

γ φαινόμενο βάρος,

i γωνία κλίσης του πρανούς, και

β γωνία κλίσης του επιπέδου ολίσθησης.

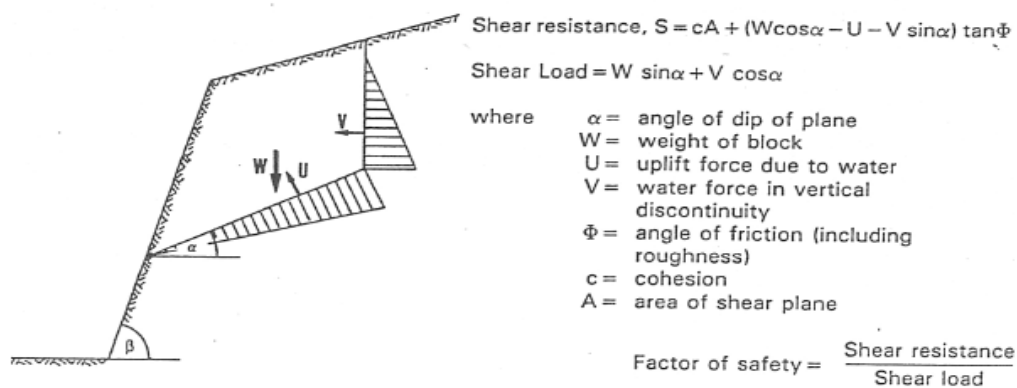
Κυκλοειδής επιφάνεια ολίσθησης

Η πλέον τυπική μορφή θραύσης εδαφικών πρανών είναι η κυκλοειδής, δηλαδή αυτή που παρουσιάζει επιφάνεια ολίσθησης κατά προσέγγιση κυκλικού τόξου (τομή σε κατακόρυφο επίπεδο). Μια τέτοια επιφάνεια έχει τα άκρα της περισσότερο επίπεδα και το κεντρικό της τμήμα κυκλικό. Προσεγγίζει καλύτερα το κυκλικό τόξο στην περίπτωση ομογενών και ισότροπων εδαφικών πρανών, ενώ διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στην περίπτωση εδαφικής ανομοιογένειας, ύπαρξης ασυνεχειών κ.λπ. Η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών στις περιπτώσεις αυτές γίνεται με τις δυο παρακάτω μεθοδολογίες οι οποίες αναλύονται στις ενότητες 3.3.2 και 3.3.3:

- Γενικευμένη μέθοδος (circular arc analysis).
- Μέθοδος των λωρίδων (method of slices).

3.1.2. Βραχώδη πρανή

Όσον αφορά τα βραχώδη πρανή, η απλούστερη περίπτωση αστοχίας είναι η ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια (επίπεδη θραύση). Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται αναλύοντας όλες τις δυνάμεις ως προς το επίπεδο ολίσθησης και διαιρώντας το άθροισμα των δυνάμεων που αντιστέκονται προς τις δυνάμεις που τείνουν να κινήσουν το τέμαχος (Σχήμα 3.3) (Στειακάκης, 2008).

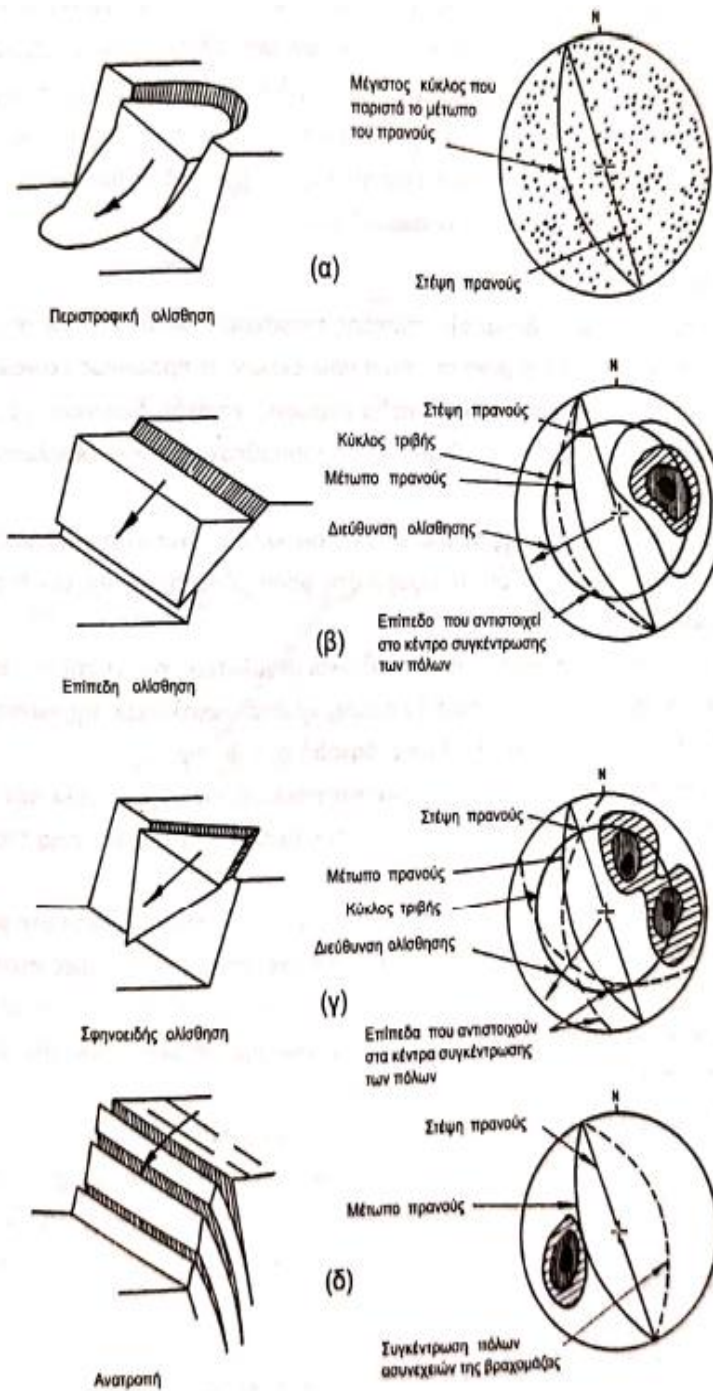


Σχήμα 3.3: Ανάλυση της ευστάθειας βραχώδους τεμάχους (Στειακάκης, 2008, από Hencher, 1987).

Η περίπτωση ανάλυσης σφηνοειδούς ολίσθησης είναι πιο περίπλοκη και ανάλυση του προβλήματος αυτού έχει δοθεί από τους Hoek and Bray (1981).

Επίσης οι Hoek and Bray (1981) έχουν προτείνει διαγράμματα χρήσιμα για το σχεδιασμό βραχωδών πρανών θεωρώντας κυκλική αστοχία. Για τις ανάγκες εκτίμησης των παραμέτρων διατμητικής αντοχής χρησιμοποιούνται εμπειρικά κριτήρια θραύσης (Hoek and Brown, 1980).

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι ολίσθησης βραχωδών πρανών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Σχήμα 3.4: Βασικοί τύποι αστοχίας βραχωδών πριανών και αντίστοιχα διαγράμματα στατιστικής επεξεργασίας των ασυνεχειών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007, από Hoek and Bray, 1973).

3.2. Καταστατικά μοντέλα

Στο πλαίσιο της κινητικής διερεύνησης ενός πρανούς, εκτός την εξέταση των τασικών συνθηκών και της γεωμετρίας, πρέπει να μελετηθεί και η σχέση τάσης – παραμόρφωσης του εδαφικού υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός συγκεκριμένου καταστατικού μοντέλου, με εξισώσεις που συνδέουν τις μετατοπίσεις με τις δυνάμεις στους κόμβους του κάθε στοιχείου και έχουν την μορφή πινάκων, οι οποίοι ονομάζονται μητρώα ακαμψίας. Συνδυάζοντας τα μητρώα ακαμψίας κάθε στοιχείου προκύπτει ο πίνακας ακαμψίας του μελετούμενου τεμάχους (Fredlund, 2016).

Η επιλογή του κατάλληλου καταστατικού μοντέλου γίνεται με βάση το υλικό, τα διαθέσιμα δεδομένα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που απαιτείται.

Επιπλέον εξισώσεις καθορίζουν τις οριακές συνθήκες και άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα φορτία – μετατοπίσεις, τοίχους αντιστήριξης κ.ά. Στην συνέχεια η λύση προκύπτει από επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση της λύσης (Fredlund, 2016).

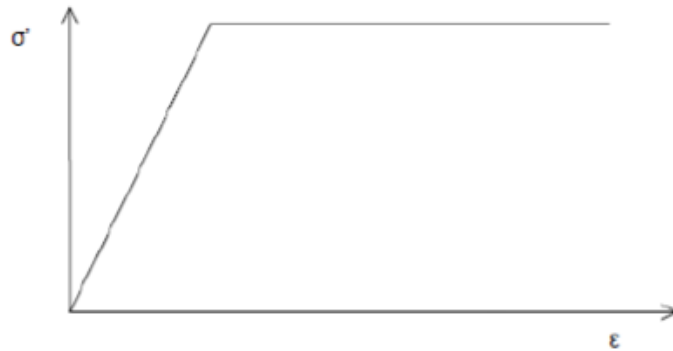
3.2.1. Μοντέλο Mohr – Coulomb (MC)

Το καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb είναι ένα μοντέλο ελαστικής- πλαστικής συμπεριφοράς. Χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους ή του βράχου και δίνει την δυνατότητα μιας γρήγορης εκτίμησης των τάσεων και των παραμορφώσεων στην υπό μελέτη περιοχή.

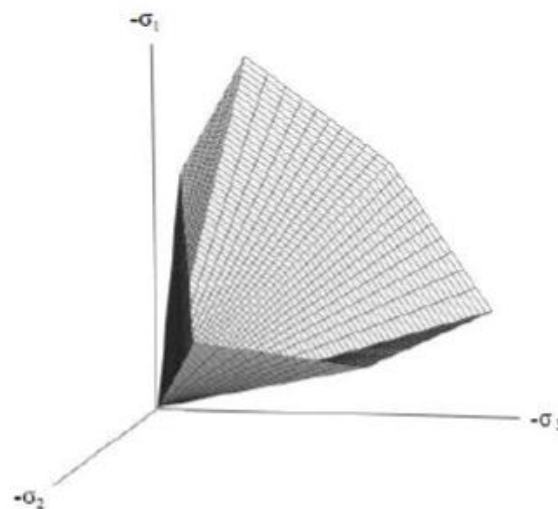
Το καταστατικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιεί την βασική αρχή της ελαστοπλαστικότητας, σύμφωνα με την οποία οι παραμορφώσεις και οι τάσεις αναλύονται σε ένα ελαστικό και ένα πλαστικό τμήμα.

Πρόκειται, ουσιαστικά, για ένα γραμμικά ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο το οποίο ορίζεται από μια σταθερή επιφάνεια διαρροής. Η επιφάνεια αυτή καθορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους του μοντέλου χωρίς να επηρεάζεται από την πλαστική παραμόρφωση (Σχήματα 3.5 και 3.6).

Η επιφάνεια διαρροής ορίζεται από έξι συναρτήσεις, οι οποίες διαμορφώνονται υπό όρους των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) (Σχήμα 3.6). Οι συναρτήσεις διαρροής λαμβάνουν υπόψη τους τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και τη συνοχή c .



Σχήμα 3.5: Ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (Συλλιγνάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).

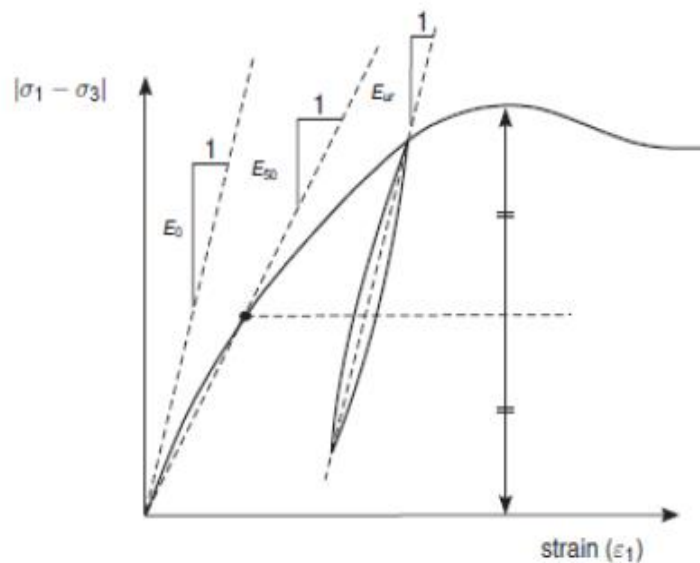


Σχήμα 3.6: Επιφάνεια διαρροής του μοντέλου Mohr Coulomb στο χώρο των κύριων τάσεων (Συλλιγνάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).

Για καταστάσεις τάσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από σημεία εντός της επιφάνειας διαρροής, η συμπεριφορά είναι καθαρά ελαστική και οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται είναι αναστρέψιμες (Σχήμα 3.6).

Γενικά για το καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb απαιτούνται συνολικά πέντε παράμετροι: το μέτρο δυσκαμψίας E , ο λόγος Poisson ν , η εσωτερική γωνία τριβής ϕ , η συνοχή c , καθώς και η γωνία διαστολής ψ που εκφράζει την διαστολή που παρουσιάζει το έδαφος κατά τη διάτμηση.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επιλογή του μέτρου δυσκαμψίας, δεδομένου ότι αρκετά εδαφικά υλικά δείχνουν μια μη γραμμική συμπεριφορά από την αρχή της φόρτισης. Στην εδαφομηχανική, στην αρχή της φόρτισης (κλίση της εφαπτομένης στο αρχικό τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης), το μέτρο ελαστικότητας δίνεται ως E_0 , ενώ το τέμνον μέτρο δυσκαμψίας στο 50% της αντοχής του εδάφους ως E_{50} (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση των μέτρων δυσκαμψίας E_0 , E_{50} , E_{ur} για στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές (CD) (Συλλιγνάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).

Σε ότι αφορά υλικά που έχουν μεγάλη γραμμική ελαστικότητα είναι πιο ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί το E_0 , αλλά συνήθως κατά την φόρτιση των εδαφών χρησιμοποιείται το E_{50} . Σε περιπτώσεις αποφόρτισης, όπως αυτή των σιράγγων και των εκσκαφών χρησιμοποιείται το μέτρο αποφόρτισης – επαναφόρτισης E_{ur} και όχι το E_{50} . Γενικά, στα εδάφη τα μέτρα δυσκαμψίας E_{ur} και E_{50} τείνουν να αυξάνονται όσο αυξάνεται και η πλευρική τάση. Σε μεγάλο βαθμό, εξαρτώνται από τις τασικές διαδρομές που

ακολουθούνται (π.χ. μεγαλύτερη ακαμψία κατά την αποφόρτιση – επαναφόρτιση σε σχέση με αυτή κατά την αρχική φόρτιση).

3.2.2. Μοντέλο Hardening Soil (HS)

Το μοντέλο κράτυνσης εδάφους (Hardening Soil Model) είναι ένα προηγμένο μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφών, τόσο των μαλακών όσο και των σκληρών (Schanz, 1998). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου κράτυνσης - εδάφους είναι η εξάρτηση της ακαμψίας από τις τάσεις.

Το καταστατικό μοντέλο HS αποδίδει μια υπερβολικού τύπου καμπύλη και περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση (Συλλιγνάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020):

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2 \cdot E_{sp}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{για } q < q_f \quad [3.3]$$

όπου,

q_a η ασυμπτωτική τιμή της αποκλίνουσας τάσης:

$$q_a = q_f / R_f \quad [3.4]$$

R_f εκφράζει την αναλογία μεταξύ της ασυμπτωτικής τάσης q_a και της τελικής αποκλίνουσας τάσης q_f (τυπική τιμή $R_f = 0.9$),

q_f η τελική αποκλίνουσα τάση με βάση το κριτήριο Mohr – Coulomb. Στην περίπτωση που $q = q_f$, ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (τέλεια πλαστική συμπεριφορά) και η τιμή q_f δίνεται από τη σχέση (Συλλιγνάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).

$$q_f = (c \cdot \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [3.5]$$

E_{50} ο συντελεστής ακαμψίας που εξαρτάται από τη ελάχιστη κύρια τάση φόρτισης και δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m \quad [3.6]$$

όπου,

E_{50}^{ref} συντελεστής ακαμψίας αναφοράς που αντιστοιχεί σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης),

m εκθέτης που εκφράζει το ποσοστό εξάρτησης της ακαμψίας από την πλευρική τάση σ_3 και εξαρτάται από το εδαφικό υλικό,

c η συνοχή (σε μονάδες τάσης), και

ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής ($^\circ$).

Η εξίσωση 3.3 εκφράζει την υπερβολική σχέση μεταξύ της κατακόρυφης παραμόρφωσης, ε_1 , και της αποκλίνουσας τάσης, q , στην τριαξονική φόρτιση.

Σε προβλήματα αποφόρτισης – επαναφόρτισης, χρησιμοποιείται ο συντελεστής ακαμψίας E_{ur} , ο οποίος επίσης εξαρτάται από τις τάσεις (Συλλινγάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020):

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_s \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m \quad [3.7]$$

όπου, E_{ur}^{ref} το μέτρο ακαμψίας του Young για αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης).

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad [3.8]$$

Το πλαστικό αυτό μοντέλο κράτυνσης ορίζεται από μια επιφάνεια διαρροής που δεν είναι σταθερή στον χώρο των κύριων τάσεων όπως συμβαίνει στο μοντέλο Mohr – Coulomb. Ειδικότερα το μοντέλο αυτό θεωρεί περιβάλλουσες επιφάνειες διαρροής που ελέγχονται κυρίως από το E_{50}^{ref} , το οποίο καθορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής σε διάτμηση.

Οι επιφάνειες αυτές δεν εκφράζουν την μεταβολή του όγκου λόγω πλαστικής παραμόρφωσης σε ισοτροπική φόρτιση. Γι' αυτό, χρησιμοποιείται άλλη μια επιφάνεια που ονομάζεται επιφάνεια διαρροής και ορίζει την ελαστική περιοχή ως προς την κατεύθυνση της μέσης ενεργής τάσης (Συλλινγάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020).

Σε μια κατάσταση ισοτροπικής συμπίεσης το μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την παράμετρο m , την πίεση αναφοράς p^{ref} και από τον

συντελεστή ακαμψίας E_{oed}^{ref} , ο οποίος προκύπτει από τον εφαπτομενικό δείκτη ακαμψίας E_{oed} στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης από δοκιμές οίδημέτρου και υπολογίζεται από την εξίσωση (Συλλινάκης, 2022, από Plaxis 2D, 2020):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_s \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m \quad [3.9]$$

όπου, E_{oed}^{ref} ο συντελεστής ακαμψίας σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης).

Οι οριακές καταστάσεις τάσεων, όπως και στο μοντέλο Mohr – Coulomb, περιγράφονται από τη γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ , τη συνοχή c και τη γωνία διαστολής ψ . Ωστόσο, η ακαμψία του εδάφους περιγράφεται καλύτερα όταν χρησιμοποιούνται η τριαξονική ακαμψία φόρτισης E_{50} , η τριαξονική ακαμψία αποφόρτισης E_{ur} και η ακαμψία φόρτισης οίδημέτρου E_{oed} .

Οι μέσες τιμές για διάφορους τύπους εδαφών είναι $E_{ur} \approx 3 E_{50}$.

3.3. Ευστάθεια πρανών

Γενικά, η ανάλυση της ευστάθειας πρανών αναφέρεται στους βασικούς μηχανισμούς και στις αρχές που οδηγούν στη δημιουργία μιας πιθανής αστοχίας (θραύσης) των πρανών, καθώς επίσης και στην ανάπτυξη και εφαρμογή των αντίστοιχων μεθοδολογιών επίλυσης έναντι της προβλεπόμενης αυτής αστοχίας. Για τον βέλτιστο σχεδιασμό των πρανών θα πρέπει σύμφωνα με τους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007) να λαμβάνονται υπόψη:

- Αντιπροσωπευτικές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων (από μέγιστες μέχρι παραμένουσες αντοχές) των γεωλογικών υλικών που συμμετέχουν.
- Οι μεταβολές της πίεσης των πόρων.
- Η ανισοτροπία και ανομοιογένεια των γεωλογικών υλικών (μεταβολές υλικού με το βάθος, στρωσιγένεια, ασυνέχειες κλπ).
- Η επίδραση αρχικών τάσεων.

- Οι συνέπειες και επιφορτίσεις λόγω κατασκευών.

Οι κύριες μέθοδοι προσέγγισης – ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών διακρίνονται σε (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Αναλύσεις οριακής ισορροπίας.
- Αναλύσεις παραμορφώσεων.

Η βασική διαφορά των δύο παραπάνω μεθόδων έχει να κάνει με την εκτίμηση ή όχι των παραμορφώσεων πριν την αστοχία. Στην περίπτωση των μεθόδων οριακής ισορροπίας δεν ενδιαφέρει η εκτίμηση των ελαστικών ή μη παραμορφώσεων αλλά η αποτροπή της αστοχίας, ενώ στις αναλύσεις παραμόρφωσης η συμπεριφορά ενός πρανούς υπαγορεύεται από το εκτιμώμενο εύρος των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

3.3.1. Αναλύσεις οριακής ισορροπίας

Η αστοχία του πρανούς προκύπτει από το γεγονός ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ολίσθησης υπερβαίνουν την διατμητική αντοχή των γεωϋλικών (Στειακάκης, 2008).

Όλες οι μέθοδοι ανάλυσης οριακής ισορροπίας παρουσιάζουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Η διερεύνηση του πρανούς έναντι αστοχίας γίνεται με το συντελεστή ασφαλείας ή ευστάθειας, FS (Factor of Safety), ο οποίος ορίζεται σαν ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς τις δυνάμεις που προκαλούν μετακίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας θραύσης, ή σαν ο λόγος των ροπών αντίστασης προς τις ροπές που προκαλούν τη μετακίνηση γύρω από ένα σημείο. Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας $FS = 1$, το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ευστάθειας ή επικείμενης αστοχίας. Προφανώς ο αποδεκτός συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση και παράγοντες όπως:

- η πιθανότητα απρόβλεπτης δυσμενούς αύξησης κάποιων φορτίων,
- η πιθανότητα απρόβλεπτης μείωσης κάποιων εδαφικών παραμέτρων (π.χ. ανομοιομορφία του εδάφους), και
- κάποιο πιθανό σφάλμα και διάφορες παραδοχές που εισάγονται από τα χρησιμοποιούμενα αναλυτικά προσομοιώματα των υπολογισμών.

Με βάση το ΦΕΚ 1221/30-11-98 περί «Ανάλυσης τιμών και λοιπών θεμάτων γεωτεχνικών ερευνών, μελετών γεωτεχνικών έργων και γεωτεχνικών μελετών», οι τιμές των απαιτούμενων συντελεστών ασφαλείας που ορίζονται για εδαφικά πρηνή εκσκαφών και επιχωμάτων είναι:

- $FS = 1.4$, για συνθήκες ομαλής φόρτισης και ομαλής λειτουργίας.
- $FS = 1.3$, για συνθήκες στατικής φόρτισης και πιθανή εκτιμώμενη ακραία περίπτωση ανύψωσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για ζωή έργου 50 χρόνια.
- $FS = 1.0$, για την περίπτωση σεισμικής φόρτισης.
- Όλες οι μέθοδοι δέχονται ένα συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος συνήθως καθορίζεται από το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Σε ομοιογενή αργιλικά εδάφη η αστοχία γίνεται κυρίως σε κυκλικές επιφάνειες, ενώ στα αμμώδη πρηνή σε ευθύγραμμες επιφάνειες ολίσθησης. Σε μη ομοιόμορφες εδαφικές συνθήκες, οι επιφάνειες ολίσθησης έχουν πιο σύνθετα σχήματα και οι αντίστοιχες αναλύσεις έχουν αναπτυχθεί σε αυθαίρετες επιφάνειες.
- Στις περισσότερες μεθόδους οριακής ισορροπίας θεωρείται ότι ικανοποιείται το κριτήριο Mohr – Coulomb κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας. Η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό:
 - των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα, και
 - της αντίστασης στη διάτμηση που αυτή επιδεικνύει.

- Τέλος, για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών, γίνονται διάφορες παραδοχές σχετικά με τις συνθήκες στατικής ισορροπίας της εδαφικής μάζας, εφόσον ο αριθμός των αγνώστων είναι μεγαλύτερος του αριθμού των εξισώσεων.

Βασικός στόχος των αναλύσεων ευστάθειας είναι να προσδιοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του πρηνούς, λαμβάνοντας υπόψη τους «παθητικούς» παράγοντες (κυρίως διατμητική αντοχή) και τους ενεργητικούς (βάρος μάζας, σεισμός, επιφορτίσεις κατασκευών, νερά κ.λπ.).

Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι απαγορευτικός, το πρηνές διαμορφώνεται ώστε να επέλθει αύξηση του μεγέθους των παθητικών δυνάμεων ή/και μείωση των ενεργητικών, με αποτέλεσμα την απόκτηση ικανοποιητικών συντελεστών ασφαλείας. Έτσι γίνεται και η διαστασιολόγηση των απαιτούμενων μέτρων προστασίας τα οποία στην ουσία συντελούν στις μεταβολές αυτές των υφιστάμενων δυνάμεων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Όσον αφορά την επιλογή παραμέτρων διατμητικής αντοχής σε **εδαφικά πρηνή**, όταν κατασκευαστεί ένα όρυγμα σε αργιλικής σύστασης έδαφος, η πίεση των πόρων εξαρτάται από την παρουσία και τη θέση καθώς και την ανταπόκριση του εδάφους στη μεταβολή των τάσεων που επιτελείται κατά την κατασκευή. Με το πέρασμα του χρόνου, οι πιέσεις των πόρων στο έδαφος αναπροσαρμόζονται μέχρι να βρεθούν σε υδροστατική ισορροπία με υφιστάμενη υδροφορία.

Αυτή η τελική ισορροπία ή κατάσταση είναι γνωστή σαν «μακροχρόνια» αντίθετα με την «βραχυχρόνια» ή «τέλος της κατασκευής» κατάσταση. Όλα τα φυσικά πρηνή βρίσκονται στη «μακροχρόνια» κατάσταση, ενώ στα τεχνητά η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, μηνών ή χρόνων, που εξαρτάται από την υδροπερατότητα του αργιλικού εδάφους.

Η «μακροχρόνια» κατάσταση που συνήθως ενδιαφέρει στις αναλύσεις ευστάθειας, εκφράζεται με τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής σε αναφορά ενεργών τάσεων (c' και φ'), οι οποίες εργαστηριακά προσδιορίζονται με τριαξονικές δοκιμές CUPP.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως στα υπερστερεοποιημένα σκληρά αργιλικά εδάφη (κυρίως μάργες), υπάρχουν περιπτώσεις θραύσεων σε πρηνή όπου φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις παραμέτρους διατμητικής αντοχής που προσδιορίζονται εργαστηριακά με τις πραγματικές όπως αυτές προκύπτουν από αντίστροφες αναλύσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ιδιάζουσα συμπεριφορά που εμφανίζουν τα εδάφη αυτά κατά τη διάτμηση (Chandler and Skempton, 1974), που έχει σχέση με την μακροπρόθεσμη μείωση της συνοχής (softening) λόγω φαινομένων διόγκωσης ή ακόμα αύξησης των διατμητικών τάσεων λόγω εκσκαφής, ενώ σημαντική είναι η επιρροή των μικροασυνεχειών που υπάρχουν στη μάζα τους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Τα υλικά αυτά εμφανίζουν συνήθως φαινόμενα προοδευτικής θραύσης (progressive failure), που σημαίνει ότι η θραύση διαδίδεται από κάποιο σημείο της επιφάνειας ολίσθησης προς τα άκρα της επιφάνειας αυτής, οπότε και η διατμητική αντοχή που κινητοποιείται είναι κάπου μεταξύ μέγιστης (peak) και παραμένουσας (residual). Τέτοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί σε μάργες του ελληνικού χώρου (Cavounidis and Sotiropoulos, 1980 και Rahakis et al., 1988) και θεωρούνται υπεύθυνα για την αστοχία αρκετών πρηνών μαργαϊκών ορυγμάτων στο οδικό δίκτυο (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Αντίθετα, στις περιπτώσεις που η θραύση του πρηνούς γίνεται σε ήδη κατολισθημένα υλικά (π.χ. επαναδραστηριοποίηση κατολισθητικών φαινομένων) χρησιμοποιούνται οι παραμένουσες τιμές αντοχής που εκτιμώνται με τις δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης (Bromhead, 1979). Προκειμένου η αντοχή που ενεργοποιείται στην επιφάνεια ολίσθησης να «πέσει» στη παραμένουσα, απαιτούνται μετακινήσεις της τάξης των 1 – 2 m (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007, από Skempton, 1977).

3.3.2. Μέθοδοι οριακής ισορροπίας

Η ανάλυση της ευστάθειας των πρηνών στις περιπτώσεις αυτές γίνεται με τις παρακάτω δύο βασικές μεθοδολογίες ανάλυσης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

A. Γενικευμένη μέθοδος (circular arc analysis).

B. Μέθοδος των λωρίδων (method of slices).

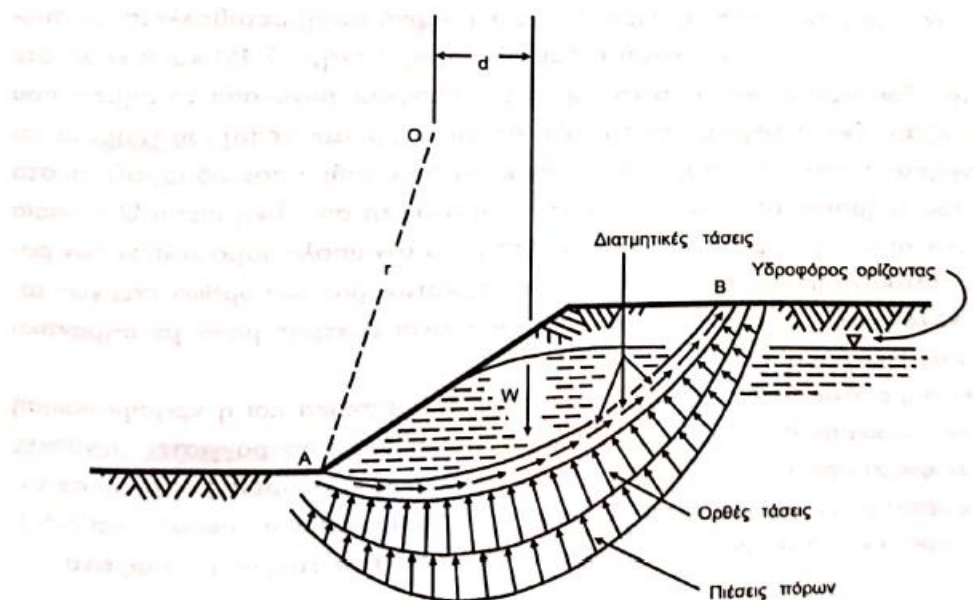
Να σημειωθεί ότι ο έλεγχος της ευστάθειας ενός πρανού με τις παραπάνω μεθοδολογίες, περιορίζεται σε ένα και μοναδικό κύκλο ολίσθησης μόνο στην περίπτωση που πρόκειται για συγκεκριμένη αστοχία που έχει συμβεί στη συγκεκριμένη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης. Σε επίπεδο μελέτης ευστάθειας ενός υφιστάμενου ή σχεδιαζόμενου πρανού, ζητείται ο προσδιορισμός του **κρίσιμου κύκλου ολίσθησης**, δηλαδή της κυκλικής επιφάνειας που παρουσιάζει τον ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας.

Αναγκαία προϋπόθεση για την εκτίμηση του κρίσιμου αυτού κύκλου είναι ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας για διάφορες θέσεις κέντρων κύκλων, διαφορετικής ακτίνας ώστε να εντοπιστεί αυτός με τον χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Αυτό αποτελεί υπολογιστική διαδικασία αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα που καθιστά βέβαια απαραίτητη τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η ανάπτυξη της **γενικευμένης μεθόδου** έγινε από τον Patterson (1995) και αναφέρεται στην εκτίμηση των ροπών περιστροφής και των ροπών αντίστασης της εδαφικής μάζας με μία υποτιθέμενη κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Οι δυνάμεις που ασκούνται στην εδαφική μάζα (Σχήμα 3.5) οφείλονται: α) στο βάρος (W) της ολισθαίνουσας μάζας, β) στις ενεργές τάσεις (N), γ) στη διατμητική αντοχή (c και τ δηλ. συνοχή και τριβή αντίστοιχα) που «κινητοποιείται» στην επιφάνεια ολίσθησης και δ) στην πίεση των πόρων (u) (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Η παραπάνω μεθοδολογία απλουστεύεται σημαντικά και η χρησιμοποίησή της είναι ευχερής σε περίπτωση που προσομοιάζονται αστράγγιστες συνθήκες του εδαφικού πρανού (π.χ. στην περίπτωση πλήρως κορεσμένης αργίλου σε ταχεία φόρτιση – βραχυπρόθεσμες συνθήκες φόρτισης, όπου ισχύει $\phi = 0$ και $c = S_u$).

Για την **μέθοδο των λωρίδων**, η οποία και εφαρμόσθηκε στην παρούσα εργασία, γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή στα επόμενα.



Σχήμα 3.5: Κατανομή των τάσεων που εξασκούνται σε εδαφική μάζα με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007, από Cernica, 1982).

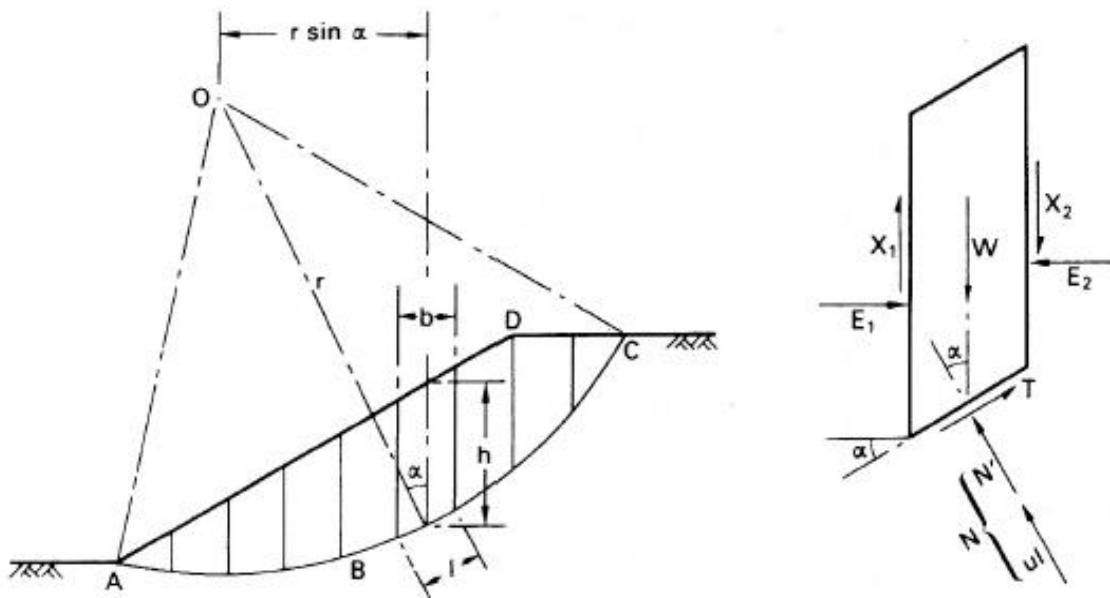
3.3.3. Μέθοδος των λωρίδων

Για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών σε ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, θεωρείται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας η οποία οριοθετεί τη μάζα του εδάφους που μπορεί να ολισθήσει. Η μάζα αυτή χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες και η ισορροπία κάθε μιας εξετάζεται χωριστά (Σχήμα 3.6) (Στειακάκης, 2008).

Η ανάλυση των δυνάμεων για κάθε λωρίδα δίνει δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και μια εξίσωση ροπών.

Δυστυχώς, ο προσδιορισμός της ορθής τάσης (N) στην επιφάνεια διάτμησης είναι πρόβλημα αόριστο, επειδή ο αριθμός των εξισώσεων ισορροπίας είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγνώστων. Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται βάσει παραδοχών (για μείωση των αγνώστων) που αφορούν κυρίως τη διεύθυνση ή/και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων.

Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι επίλυσης, οι οποίες διαφοροποιούνται μεταξύ τους, κυρίως ως προς τις αντίστοιχες παραδοχές σχετικά με τη δράση των πλευρικών δυνάμεων (δηλαδή, των X και E).



Σχήμα 3.6: Η μέθοδος των λωρίδων. Ορισμός των λωρίδων και ανάλυση των δυνάμεων που επενεργούν σε κάθε λωρίδα (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1983).

Μέθοδος Fellenius (ή Σουηδική μέθοδος)

Είναι η παλαιότερη και δεν λαμβάνει υπόψη της όλες τις δυνάμεις που επενεργούν στην κάθε λωρίδα. Παραλείπει τις διατμητικές, τις ορθές τάσεις και τις πιέσεις των πόρων που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας- θεωρεί δηλαδή ότι η συνιστάμενη των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενική.

Η παραδοχή αυτή οδηγεί συνήθως σε υπο-εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας κατά 10 – 15%, ενώ στην περίπτωση απότομων πρανών σε σχηματισμούς με μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής, η υπο-εκτίμηση αυτή μπορεί να πλησιάσει και το 60%, (Hunt, 1986) (Στειακάκης, 2008).

Για την εκτίμηση της ευστάθειας, το πρανές σχεδιάζεται υπό κλίμακα και η θεωρούμενη μάζα αστοχίας χωρίζεται σε λωρίδες. Θεωρούνται οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα λόγω του βάρους της, ενώ με βάση την πιεζομετρική επιφάνεια εκτιμάται και η πίεση των πόρων (u) στη βάση της λωρίδας (Σχήμα 3.6).

Κάθε μία από τις δυνάμεις αυτές αναλύονται σε μια κάθετη και μια παράλληλη στην επιφάνεια διάτμησης συνιστώσα. Ο συντελεστής ασφάλειας (FS) προσδιορίζεται από τις ροπές ως προς το κέντρο του υπό εξέταση κυκλικού τομέα

Θεωρώντας διάφορες επιφάνειες ολίσθησης, πραγματοποιούνται επιλύσεις για κύκλους με διαφορετικές ακτίνες και κέντρα, οπότε εντοπίζεται η κρίσιμη επιφάνεια, ο κύκλος δηλαδή με τον μικρότερο συντελεστή ασφάλειας που προσδιορίζει και την ευστάθεια του πρανούς (Στειακάκης, 2008).

Τροποποιημένη (Modified) μέθοδος Bishop

Αφορά μια απλούστευση της αρχικής πρότασης του Bishop (complete Bishop method). Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος και θεωρεί ότι οι εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων είναι αρκετά μικρές και μπορούν να παραληφθούν. Οι ορθές τάσεις στην επιφάνεια διάτμησης, προσδιορίζονται θεωρώντας ισορροπία δυνάμεων κατά την κατακόρυφο διεύθυνση (Στειακάκης, 2008).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά οι μέθοδοι Bishop δίδουν υψηλές τιμές συντελεστών ασφάλειας (FS), όταν η γωνία της επιφάνειας αστοχίας στο κατώτερο τμήμα του πρανούς προσεγγίζει τις 30° . Η γωνία αυτή διαμορφώνεται όταν οι κύκλοι αστοχίας είναι βαθείς ή το κέντρο τους βρίσκεται ακριβώς πάνω από την κορυφή του πρανούς (Craig, 1983) (Στειακάκης, 2008).

Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

Προτάθηκε από τους Janbu, Bjerrum and Kjarnsli (1956) και χρησιμοποιεί την ίδια παραδοχή με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop, αλλά λαμβάνει επιπρόσθετα υπόψη και την επιρροή των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων χρησιμοποιώντας έναν εμπειρικό διορθωτικό συντελεστή.

Ο συντελεστής αυτός είναι προκαθορισμένος και οι τιμές του εξαρτώνται από τη συνοχή, τη γωνία εσωτερικής τριβής και το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Δηλαδή, η επιφάνεια

ολίσθησης μπορεί να μην είναι κυκλική αλλά γενικότερα καμπυλόγραμμη (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Η γενικευμένη μέθοδος που πρότεινε ο Janbu (1957), δέχεται ότι είναι γνωστή η θέση του σημείου εφαρμογής των διαλωριδικών δυνάμεων. Τα σημεία αυτά μάλιστα αποτελούν μία καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη ωθήσεων.

Με αναλύσεις όπως των Janbu και SARMA, είναι δυνατόν να θεωρηθούν επιφάνειες αστοχίας διάφορες της κυκλικής (Στειακάκης, 2008).

Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) ακολούθησε τη γενικότερη μεθοδολογία των λωρίδων και πρότεινε ότι η επίδραση των εσωτερικών δυνάμεων που δρουν σε μια λωρίδα, μπορούν να αντικατασταθούν από τη συνισταμένη τους, η οποία εφαρμόζεται με γωνία (θ) με την οριζόντια και διέρχεται από το μέσον λωρίδας ώστε να ικανοποιεί την ισορροπία των ροπών. Γενικά η συνισταμένη και η γωνία (θ) μεταβάλλονται από λωρίδα σε λωρίδα.

Στη μέθοδο αυτή ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας των οριζόντιων και κατακόρυφων εσωτερικών δυνάμεων, καθώς επίσης των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ως προς το κέντρο περιστροφής (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Για λόγους απλοποίησης η γωνία (θ) θεωρείται σταθερή, οπότε η τιμή του συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται προφανώς από τη σταθερή τιμή της γωνίας θ . Για κάθε τιμή της θ ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων (F_f) δεν είναι ίσος με τον συντελεστή ασφαλείας που υπολογίζεται από την ισορροπία των ροπών (F_m). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή των F_f και F_m με τις τιμές της γωνίας θ . Η τομή των δυο καμπυλών (των F_f και F_m με τη γωνία θ) δίνει το ζεύγος των τιμών θ και F που ικανοποιούν όλες τις εξισώσεις.

Αν η γωνία θ γίνει μηδέν (δηλαδή, συνισταμένη οριζόντια) οι παραπάνω εξισώσεις καταλήγουν στην απλοποιημένη μέθοδο Bishop, πράγμα που σημαίνει ότι η μέθοδος Bishop αποτελεί υπολογισμό του F_m με $\theta = 0$.

Μέθοδος Morgenstern – Price

Οι Morgenstern and Price (1965) ανέπτυξαν μία μέθοδο ανάλυσης που αναφέρεται σε μη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις στατικής ισορροπίας. Η μέθοδος δέχεται ότι η σχέση μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων έχει τη μορφή (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

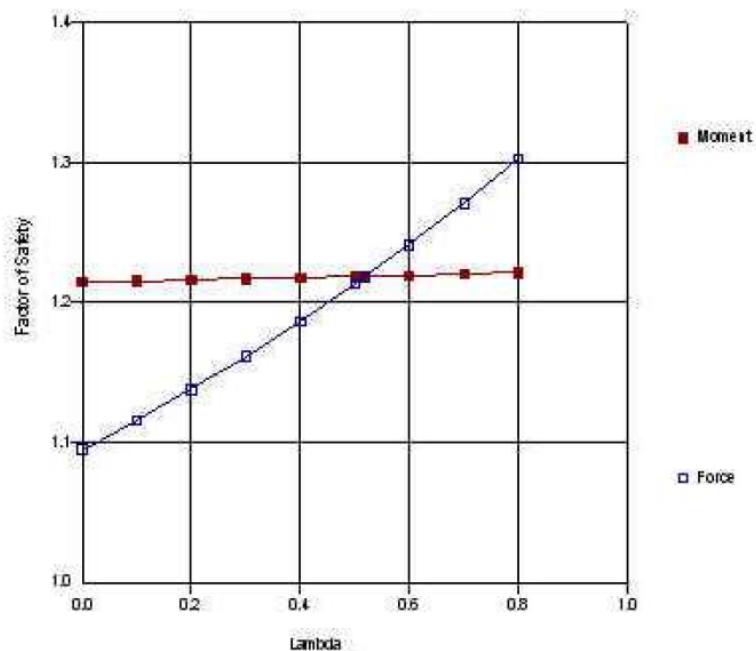
$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad [3.10]$$

όπου,

λ πηλίκο διατμητικών και ορθών τάσεων (Σχήμα 3.7),

$f(x)$ συνάρτηση που αναφέρεται στη μεταβολή των εσωτερικών δυνάμεων, και

X, E οι πλευρικές δυνάμεις.



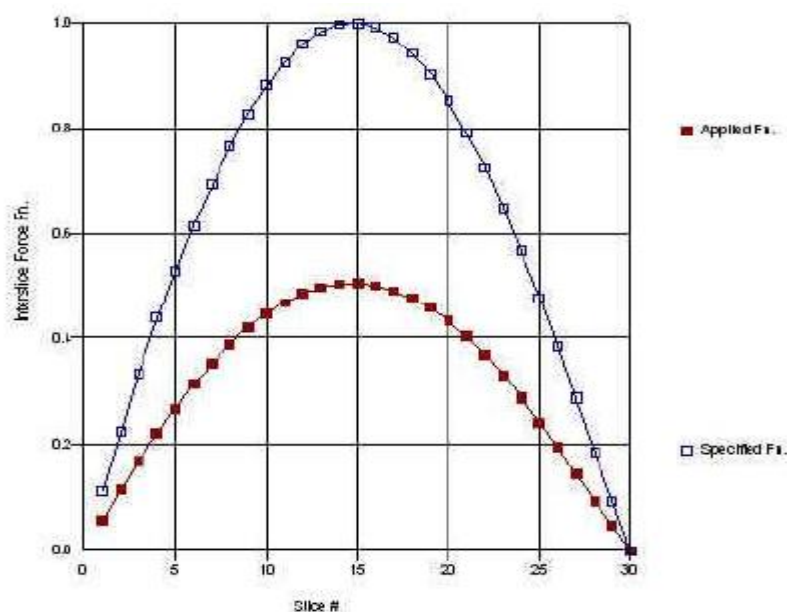
Σχήμα 3.7: Συντελεστές ασφαλείας σε σχέση με το λ (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

Η γενικευμένη θεώρηση της μεθόδου είναι ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ δύο λωρίδων έχει προκαθορισμένη κλίση κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Η τιμή της κλίσης ορίζεται από το χρήστη.

Η μέθοδος Morgenstern – Price, όπως και η μέθοδος Spencer, εξετάζει τόσο τις κανονικές όσο και τις διατμητικές δυνάμεις και ικανοποιεί τόσο την ισορροπία δυνάμεων όσο και ροπών. Η μόνη διαφορά μεταξύ των μεθόδων είναι ότι η Morgenstern – Price επιτρέπει τον καθορισμό διαφορετικών τύπων συναρτήσεων δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων.

Το SLOPE/W δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων συναρτήσεων δύναμης μεταξύ των τομών και παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαφορά στους συντελεστές ασφαλείας όταν χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι Spencer ή Morgenstern – Price, με την προϋπόθεση ότι η συνάρτηση δύναμης μεταξύ των τομών είναι σταθερή, δηλαδή, $f(x) = 1$. Διαφοροποίηση υπάρχει μόνο όταν χρησιμοποιείται μια μη σταθερή συνάρτηση δύναμης μεταξύ των τομών.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι καθορισμένες και οι εφαρμοζόμενες συναρτήσεις δύναμης που προκύπτουν από την ανάλυση με τη μέθοδο Morgenstern-Price. Η καθορισμένη συνάρτηση ξεκινά από το μηδέν σε κάθε άκρο και κορυφώνεται στο 1 κοντά στο κέντρο της επιφάνειας ολίσθησης. Δεδομένου ότι η τιμή Lambda (λ) για αυτή την ανάλυση είναι 0.5054, η εφαρμοζόμενη συνάρτηση είναι 0.5054 φορές η καθορισμένη συνάρτηση (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).



Σχήμα 3.8: Καθορισμένες και εφαρμοζόμενες συναρτήσεις δύναμης μεταξύ των τομών μισού ημιτόνου (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

Με φυσικούς όρους, αυτό σημαίνει ότι οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των επιφανειών είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις ορθές δυνάμεις στην κορυφή και στο άκρο της επιφάνειας ολίσθησης. Στη μέση όπου η καθορισμένη συνάρτηση φτάνει το 1, ο λόγος διάτμησης προς την κανονική φτάνει το 0.5054. Ελέγχοντας τις δυνάμεις στην κορυφή, στη μέση και στο πόδι της επιφάνειας ολίσθησης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαφορά στους συντελεστές ασφαλείας όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος Spencer ή η μέθοδος Morgenstern – Price, με συνάρτηση δύναμης μεταξύ των τομών μισού ημιτόνου (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

Παρατηρήσεις για τις μεθόδους λωρίδων

Η επίλυση όλων ανεξαρτήτως των μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας πρανών με το διαχωρισμό σε επιμέρους λωρίδες αν πιθανώς εξαιρέσουμε τη Σουηδική μέθοδο είναι στην πράξη υλοποιήσιμη μόνο με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού σε Η/Υ καθόσον, „ Με τον τρόπο αυτόν, η ευστάθεια ενός πρανού είναι υπολογιστικά εύκολη αλλά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται κυρίως από τη «σωστή» εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Μια συγκριτική θεώρηση των μεθόδων ανάλυσης οδηγεί στις παρακάτω σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμογή τους:

1. Ορισμένες από τις μεθόδους ανάλυσης δεν ικανοποιούν όλες τις εξισώσεις ισορροπίας. Έτσι, οι απλοποιημένες μέθοδοι των Bishop και Janbu δεν ικανοποιούν την ισορροπία δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση ούτε την ισορροπία ροπών σε κάθε λωρίδα. Ικανοποιούν όμως την ισορροπία ροπών στο σύνολο της μάζας που ολισθαίνει. Η μέθοδος Fellenius ικανοποιεί επίσης μόνο την ισορροπία ροπών στο σύνολο της μάζας που ολισθαίνει.
2. Η μέθοδος Spencer και κυρίως η Morgenstern – Price μπορούν να εφαρμοστούν σε περίπτωση μη κυκλικής (σύνθετης) επιφάνειας ολίσθησης.

3. Οι «ακριβείς» μέθοδοι, δίνουν πρακτικά τον ίδιο συντελεστή ασφάλειας. Ακόμα και σε ανομοιογενή εδάφη οι διαφορές του συντελεστή ασφαλείας δεν είναι μεγαλύτερος του 15% (Duncan and Wright, 1980).
4. Η τροποποιημένη μέθοδος Bishop, αν και δεν ικανοποιεί όλες τις συνθήκες ισορροπίας, δίνει περίπου τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας με αυτές μεγαλύτερης ακρίβειας.
5. Η μέθοδος Fellenius δίνει τιμές γενικά μικρότερες από τις άλλες μεθόδους. Είναι συνεπώς συντηρητική και η χρήση της συνίσταται μόνο για προκαταρκτικές εκτιμήσεις και σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση άλλης ακριβέστερης μεθόδου (Καβαδάς και Αλκαλάης, 1988). Μπορεί να δώσει τιμές μέχρι και 50% μικρότερες από τη «σωστή» τιμή αν χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις με ενεργές τάσεις και υψηλές πιέσεις πόρων. Αντίθετα, σε αναλύσεις με ολικές τάσεις (χωρίς πιέσεις πόρων) δίνει αρκετά μικρότερες διαφορές (Duncan and Wright 1980).

3.4. Ανάλυση ευστάθειας πρανών με το λογισμικό SLOPE

Το SLOPE/W χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ευστάθειας και παρέχει γραφικές απεικονήσεις των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, διευκολύνοντας τους μηχανικούς να αξιολογούν και να ερμηνεύουν την ευστάθεια των πρανών.

Η ανάλυση της ευστάθειας πρανών στο λογισμικό SLOPE/W γίνεται μέσω της σύγκρισης των δυνάμεων / ροπών που ασκούνται στο πρανές με τις δυνάμεις / ροπές αντίστασης που μπορούν να αποτρέψουν την αστοχία του. Δηλαδή, βασίζεται στις αρχές της οριακής ισορροπίας, η οποία υποθέτει ότι ένα πρανές αστοχεί όταν οι κινητήριες δυνάμεις υπερβαίνουν τις δυνάμεις αντίστασης.

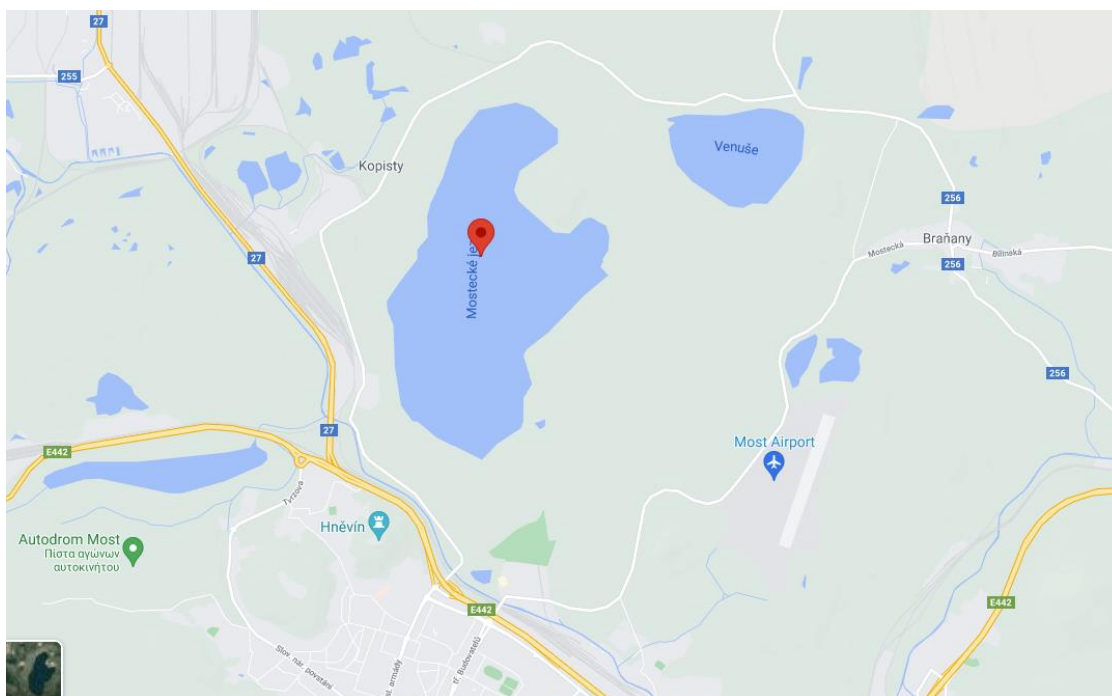
Τα βασικά βήματα για την ανάλυση αυτή είναι:

- Ο καθορισμός της γεωμετρίας του πρανούς.
- Ο καθορισμός των ιδιοτήτων του εδάφους, ή άλλων υλικών που αποτελούν το πρανές, όπως οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, το μοναδιαίο βάρος και η συνοχή, που προσδιορίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών ή δοκιμών πεδίου.

- Ο προσδιορισμός των συνθηκών φόρτισης. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα διάφορα φορτία που δρουν στο πρανές, όπως το ίδιο βάρος, τα φορτία προσαύξησης και τα εξωτερικά φορτία από κατασκευές ή νερό.
- Ο καθορισμός του μηχανισμού αστοχίας. (περιστροφικές ολισθήσεις, μεταφορικές ολισθήσεις ή συνδυασμό των δύο).
- Η εφαρμογή ανάλυσης οριακής ισορροπίας. Η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς πραγματοποιείται με την εφαρμογή των αρχών της οριακής ισορροπίας. Οι δυνάμεις / ροπές που προκαλούν αστάθεια, όπως το βάρος του εδάφους, η πίεση του νερού και τυχόν πρόσθετα φορτία, συγκρίνονται με τις δυνάμεις / ροπές αντίστασης που παρέχονται από τη διατμητική αντοχή του εδάφους και τυχόν εξωτερικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην ευστάθεια.
- Η ανάλυση ευαισθησίας και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση των επιπτώσεων των μεταβολών των ιδιοτήτων του εδάφους, της γεωμετρίας ή των συνθηκών φόρτισης στην ευστάθεια του πρανούς. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του οικονομοτεχνικά καλύτερου σχεδιασμού πρανών.

4. ΠΕΔΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η τεχνητή λίμνη Most βρίσκεται μεταξύ των λόφων Hněvín (+ 399 m) και Špičák (+ 399 m), στη Βόρεια Βοημία της Τσεχίας (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Θέση λίμνης Most (www.google.com/maps/place/Mosteck%C3%A9+jezero/@50.5342091,13.6276483,13.5z).

Η λίμνη δημιουργήθηκε στην θέση όπου το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα γινόταν εξόρυξη λιγνίτη. Η εξόρυξη αυτή τερματίστηκε οριστικά στις 24 Αυγούστου 1999 (RFCS, 2020).

Η λίμνη βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της ομώνυμης λεκάνης που εκτείνεται σε 870 km². Το βαθύτερο μέρος της λεκάνης Most είναι η λεγόμενη κεντρική περιοχή μεταξύ των πόλεων Litvínov, Osek, Duchcov και των χωριών Lom και Mariánské Radčice και φτάνει τα 75 m βάθος.

Οι πλησιέστερες ανθρωπογενείς δραστηριότητες βρίσκονται στον οικισμό Most – Kopisty, περίπου 800 m από τη δυτική όχθη της λίμνης, στο Most Souš, περίπου 800 m νοτιοδυτικά

της όχθης της λίμνης στη βιομηχανική περιοχή RICO, περίπου 1 km από τη νότια όχθη της λίμνης (RFCS, 2020).

4.1. Ιστορικό εξόρυξης στην περιοχή μελέτης

Η εξορυκτική δραστηριότητα στην περιοχή ξεκίνησε τον 18ο αιώνα και άλλαξε το αρχικό ανάγλυφο της λεκάνης. Αρχικά, η εξόρυξη λιγνίτη πραγματοποιούνταν υπόγεια και συνδέθηκε με τη βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης Most.

Οι πρώτες καταγραφές σημαντικής εξορυκτικής δραστηριότητας στην περιοχή χρονολογούνται στο 1791, με τις εργασίες να λαμβάνουν χώρα στο ορυχείο Magdalena και στο 1850 με εξόρυξη στο ορυχείο Mariahilfe. Το 1870 ιδρύεται το ορυχείο Viktor, το οποίο 3 χρόνια αργότερα πωλείται μαζί με το Magdalena στη σιδηροδρομική εταιρεία Prague-Duchcov, η οποία άνοιξε εκεί το ορυχείο Bedřich, όπου η εξόρυξη πραγματοποιούνταν και υπόγεια και υπαίθρια (RFCS, 2020).

Το ορυχείο Julius II ιδρύεται το 1878 (αργότερα μετονομάστηκε M.J. Hus) στην περιοχή του μελλοντικού ορυχείου Ležáky. Στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, αναπτύσσεται το ορυχείο Segen-gottes.

Το 1895, η υπόγεια εξόρυξη στο ορυχείο Anna είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή 25 σπιτιών και ζημιές σε άλλα 57 σπίτια (RFCS, 2020).

Στο ορυχείο Richard, που άνοιξε το 1903, η εξόρυξη πραγματοποιούνταν χειροκίνητα και η απόδοση κυμαινόνταν μεταξύ 200 – 300 χιλιάδων τόνων ετησίως (RFCS, 2020).

Το ορυχείο Richard έγινε το θεμέλιο του μελλοντικού ορυχείου Ležáky (RFCS, 2020).

Μετά το 1948, υπήρξε ταχεία ανάπτυξη της εξόρυξης λιγνίτη με τη μορφή μεγάλων ορυχείων, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την κατεδάφιση του ιστορικού Most (1965 – 1987) και την κατασκευή μιας νέας πόλης.

Ένα από τα κύρια κριτήρια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με τη μείωση της παραγωγής ήταν το κόστος των εργοταξίων που λειτουργούσαν.

Το κόστος του ορυχείου Ležáký ήταν 1.5 – 2 φορές μεγαλύτερο από ό,τι σε άλλα εργοτάξια στο πρώτο μισό της δεκαετίας του 1990. Για το λόγο αυτό, τελικά αποφασίστηκε η εγκατάλειψή του και η περιβαλλοντική αποκατάσταση της περιοχής με την δημιουργία της τεχνητής λίμνης Most (RFCS, 2020).

4.2. Πλήρωση εκσκαφών με νερό και δημιουργία της λίμνης

Η λίμνη Most δημιουργήθηκε με την πλήρωση της εκσκαφής που δημιουργήθηκε από την παλαιότερη λειτουργία του ορυχείου Most – Ležáký και διάφορων άλλων μικρότερων λατομείων της περιοχής. Η πλήρωση άρχισε στις 24 Οκτωβρίου 2008 ως εκτεταμένη υδραυλική αποκατάσταση που παρείχε η κρατική επιχείρηση Palivoný kombinát Ústí, στο πλαίσιο της αναζωογόνησης της περιοχής (RFCS, 2020).

Από το 2002, όταν και ολοκληρώθηκε η αποστράγγιση του ορυχείου στο χαμηλότερο μέρος του πυθμένα της εκσκαφής, το νερό είχε σωρευτεί αποκλειστικά εξαιτίας την βροχόπτωσης και κάποιες πηγές που υπήρχαν στις πλαγιές του ορυχείου. Στην αρχή της πλήρωσης, η λίμνη είχε έκταση 21.6 εκτάρια (216.000 m^2), βάθος 21.12 m και ύψος νερού +145.12 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Τον Σεπτέμβριο του 2014, με τη λήξη της πλήρωσης, η λίμνη είχε έκταση 309.41 εκτάρια ($3.094.100 \text{ m}^2$), με 70.48 εκατομμύρια m^3 νερού. Το επίπεδο της λίμνης Most έφτασε σε υψόμετρο +199 m με εύρος διακύμανσης της στάθμης $\pm 60 \text{ cm}$ (RFCS, 2020).

Η λίμνη είναι μία από τις πιο σημαντικές ορνιθολογικές τοποθεσίες στην Τσέχικη Δημοκρατία. Αυτό οφείλεται στις πολυποίκιλες συνθήκες των οικοτόπων της συγκεκριμένης περιοχής που ταυτίζονται με οικοσυστήματα που έχουν πληγεί ανθρωπογενώς (RFCS, 2020).

Πέρα από τα πτηνά, εντοπίστηκαν στη λίμνη και 7 είδη αμφίβιων και 2 είδη ερπετών.

Στο πλαίσιο μελέτης της ευρύτερης περιοχής, διερευνήθηκαν οι υδρολογικές και οι υδρογεωλογικές συνθήκες της λίμνης (RFCS, 2020). Από την ανάλυση που έγινε στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα αλλά και στα διαλυμένα σε αυτά χημικά στοιχεία και

ιόντα προέκυψε ότι η συγκέντρωση των περισσότερων ρύπων μειώνεται σταδιακά. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, ο χρόνος επίτευξης αποδεκτών συγκεντρώσεων εκτιμάται στα επόμενα 30 χρόνια (RFCS, 2020).

4.3. Γεωλογία και λιθοστρωματογραφία της περιοχής

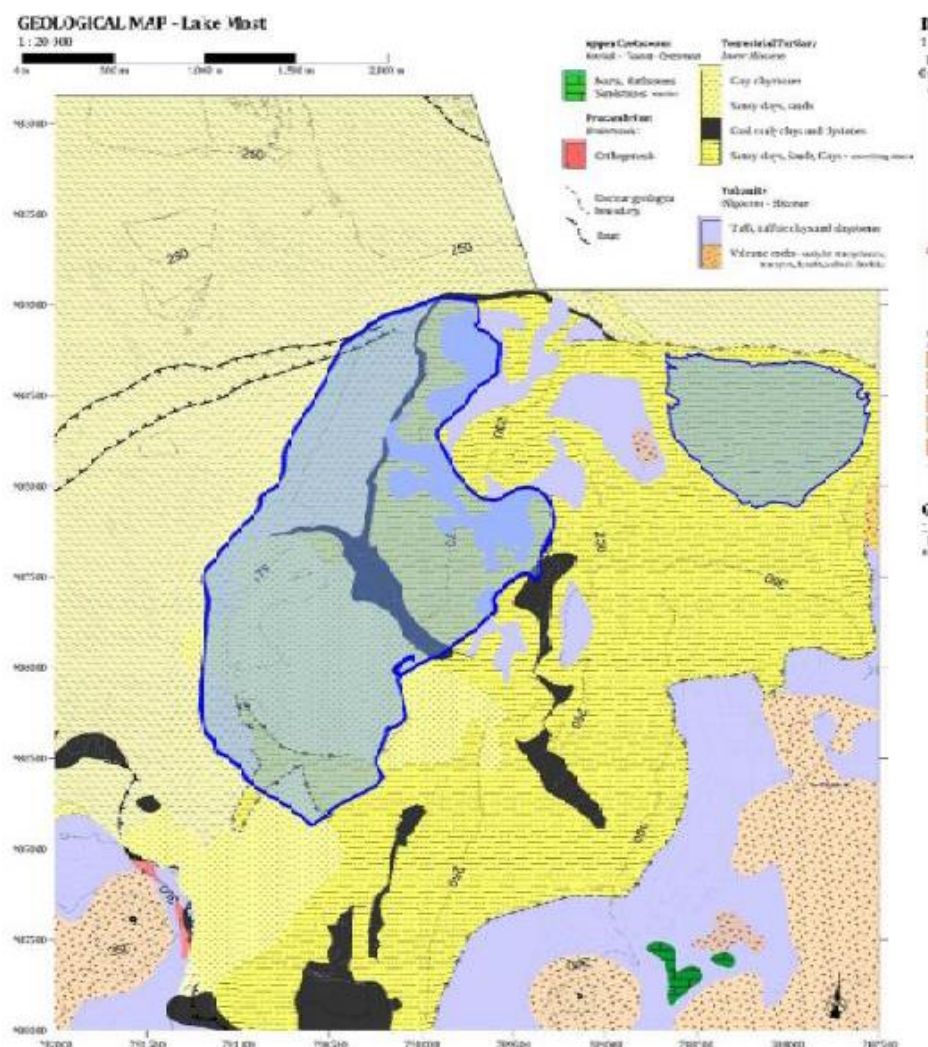
Η λίμνη Most είναι μέρος μιας Τριτογενούς ιζηματογενούς λεκάνης. Πάνω από 500 m οργανικής ύλης, αργίλου και άμμου έχουν συσσωρευτεί στον πυθμένα της λεκάνης. Κάτω από αυτά τα υλικά υπάρχει ένα στρώμα λιγνίτη που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης. Το ανώτερο εδαφικό κάλυμμα αποτελείται κυρίως από άργιλο, άμμο και χαλίκια, που συνιστούν τα Τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής (βλέπε Σχήμα 4.2) (RAFF, 2022).

Οι όχθες της λίμνης σχηματίζονται είτε σε πρανή αποθέσεων (εδάφη απόρριψης) που προέκυψαν από εξορυκτική δραστηριότητα είτε σε βαθμίδες των γεωυλικών σχηματισμών που διαμορφώθηκαν με την εκσκαφή. Οι εδαφικές αποθέσεις εντοπίζονται κυρίως στις νότιες και ανατολικές πλαγιές της λίμνης (Σχήμα 4.2).

Κάτω από τον λόφο Hněvín, στην περιοχή που βρίσκεται η τεχνητή κοίτη του ποταμού Bílina, έχει σχηματιστεί μια απόθεση σε μήκος 1.200 m, πλάτος 250 m και ύψος 15 m (Σχήμα 4.3) (RAFF, 2022).

Η νότια πλαγιά της λίμνης σχηματίζεται από εσωτερικές αποθέσεις του ορυχείου Most (Lekazy – Most dump) και έχει γενική κλίση $5 - 10^\circ$ προς τον Βορρά. Οι επιμέρους βαθμίδες έχουν κλίση έως 2° , ύψος 10 – 15 m και χαρακτηρίζονται ελαφρώς κεκλιμένες.

Σε ένα μεγάλο τμήμα της απόθεσης η κλίση ομαλοποιείται, σχηματίζοντας μια απέραντη πεδιάδα σε ύψος 250 m, όπου βρίσκεται η βιομηχανική περιοχή RICO και ο Καθεδρικός Ναός της Κοίμησης της Θεοτόκου (RAFF, 2022).



Σχήμα 4.2: Γεωλογικός χάρτης στην περιοχή της λίμνης Most (RAFF, 2022).

Συνεχίζοντας ανατολικά προς την κατεύθυνση της απόθεσης Rudolice συνεχίζεται η ανάπτυξη της λίμνης Most στα +290 m (Σχήμα 4.3). Η γενική κλίση του πρανούς είναι 1:17 (5°) και έχει νότιο προσανατολισμό.

Η ανατολική όχθη της λίμνης σχηματίζεται από τα εδάφη της απόθεσης Střimická (Střimická dump).

Βορειοανατολικά της απόθεσης Střimická κατασκευάστηκε η απόθεση Paridla (Paridla dump), με γενική κλίση πρανών 1:3 έως 1:5 και είναι γενικά σταθερή, αλλά επιρρεπής σε επιφανειακή διάβρωση (RAFF, 2022).

Το βαθύτερο υπέδαφος της λεκάνης αποτελείται από γνεύσιο του κρυσταλλικού συμπλέγματος. Αυτά τα πετρώματα εμφανίζονται στην επιφάνεια μόνο στις ανατολικές και νοτιοανατολικές πλαγιές του λόφου Hněvín, όπου βρέθηκε τεράστιο τέμαχος κρυσταλλικών πετρωμάτων (RFCS, 2020).

Η επιφάνεια του κρυσταλλικού συμπλέγματος περιέχει απογυμνωμένα υπολείμματα Κρητιδικών ιζημάτων μαρμάρου. Αυτά τα ιζήματα φτάνουν σε σημαντικό πάχος (δεκάδες μέτρα) στα ανατολικά και βόρεια τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος (προς το ορυχείο Bílina).

Στα δυτικά και ανατολικά έως βόρεια τμήματα της περιοχής εντοπίζονται ηφαιστειακά πετρώματα που φτάνουν σε πάχος δεκάδων μέτρων. Το πιο χαρακτηριστικό ηφαιστειακό ύψωμα είναι ο λόφος Hněvín. (RFCS, 2020).

Ένα άλλο σημαντικό ηφαιστειακό ύψωμα είναι ο λόφος Kočiří που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής και αποκαλύφθηκε κατά τις εργασίες εξόρυξης στην θέση Ležáky.

Καθώς η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή υποχώρησε ηφαιστειακά πετρώματα υπέστησαν έντονη αποσάθρωση, με αποτέλεσμα να σχηματιστούν αργιλικά πετρώματα.

Στο νοτιοανατολικό τμήμα του κοιτάσματος, περίπου από την περιοχή των ορυχείων Enžem (Ležáky II) προς τη νότια έξοδο, εντοπίζονται κυρίως άμμοι. Το πάχος των ιζημάτων της αργίλου και της άμμου είναι μεταβλητό και κυμαίνεται από 0 έως 20 m (RFCS, 2020).

Το χαμηλότερο, πολυποίκιλο και τοπικά μεταβαλλόμενο μέρος των ιζημάτων αποτελείται από αποθέσεις παλαιότερων πετρωμάτων (RFCS, 2020).

Στα περίχωρα του πρώην χωριού Koristý, ο λιγνίτης φτάνει το μέγιστο πάχος των 16.2 m. Προς τα δυτικά, το πάχος του μειώνεται σε περίπου 1 m. Στα βόρεια συρρικνώνεται και μετατρέπεται σε αργιλικό πέτρωμα. Νότια, το πάχος του λιγνίτη μειώνεται και πλησιάζει την κύρια φλέβα άνθρακα. Ο λιγνίτης διαχωρίζεται από την κύρια φλέβα από αργιλικά πετρώματα, των οποίων το πάχος κυμαίνεται από λίγα μέτρα έως δεκάδες μέτρα (RFCS, 2020).

Η κύρια φλέβα άνθρακα αναπτύσσεται ομοιόμορφα με τρία ανιχνεύσιμα στρώματα. Το κατώτερο στρώμα του έχει μεταβλητή περιεκτικότητα σε τέφρα με πάχος γύρω στα 5 m. Η μετάβαση από το κατώτερο στο μεσαίο στρώμα είναι ομαλή και αυτό οφείλεται στη σημαντική μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα στην τέφρα. Το κύριο κλαστικό συστατικό του κατώτερου στρώματος αποτελείται κυρίως από αργιλικά πετρώματα.

Το μεσαίο στρώμα αντιπροσωπεύει μια περίοδο αδιάκοπης ανάπτυξης άνθρακα χωρίς συμβολή κλαστικού υλικού. Το πάχος του είναι περίπου 18 έως 20 m. Περιέχει αρκετές αργιλικές ζώνες πάχους αρκετών εκατοστών, που υποδηλώνουν βραχυπρόθεσμες διακοπές ιζημάτων άνθρακα με τη συμβολή του αργιλικού υλικού (RFCS, 2020).

Στο τελευταίο ανώτερο στρώμα, βρίσκονται αργιλικά ιζήματα με διάφορες αναλογίες άνθρακα και ποικίλα πάχη. Ξεκινάνε από 2 m στην οροφή του μεσαίου στρώματος και συνεχίζουν πάνω από αυτό με ένα στρώμα περίπου 4 m. Το μέγιστο πάχος φτάνει τα 14 m.

Σε αυτό το στρώμα υπάρχει μια ζώνη υψηλής ποιότητας άνθρακα, της οποίας το πάχος είναι σταθερό μεταξύ 2 και 3 m, στα περισσότερα σημεία, με μέγιστο πάχος τα 5 m.

Η απόθεση λιγνίτη συνίσταται κυρίως από αργιλικές προσμίξεις διαφόρων αναλογιών. Στις περιοχές που πλήττονται από μεταναστευτικά ρεύματα και στο δέλτα του ποταμού έχουν αναπτυχθεί αμμώδη ιζήματα (RFCS, 2020).

Στα υπερκείμενα αργιλικά ιζήματα του κεντρικού τμήματος της λεκάνης Most ορίζονται δύο οριζόντες ιζημάτων. Ένας ορίζοντας από συμπαγή αργιλικά πετρώματα, με μεταβλητή αναλογία μείγματος ανθρακικών που βρίσκεται πάνω από το ανώτατο όριο της ανθρακικής φλέβας, και ένας ορίζοντας από αμμώδη άργιλο, άμμο και ανθρακικά ιζήματα, με πολύ μεταβλητή πετρογραφική σύνθεση. Αυτός ο ορίζοντας οριοθετείται στο δέλτα του ποταμού Bilina (RFCS, 2020).

Τέλος, υπάρχουν τα Τεταρτογενή ιζήματα, που αποτελούνται από άργιλο, χαλίκια, αμμοχάλικα και μικρές ποσότητες αργίλου. Τα παλαιότερα ιζήματα είναι σε μεγάλο βαθμό αργιλώδη, το πάχος των οποίων παρουσιάζει διακυμάνσεις από τα πρώτα μέτρα μέχρι και τους πρόποδες του λόφου Hnevin.

Κάποια από αυτά τα Τεταρτοταγή ιζήματα αφαιρέθηκαν σε σημαντικό ποσοστό στο παρελθόν, μαζί με άλλα υπερκείμενα στρώματα και ανθρακικά ιζήματα, λόγω της εξορυκτικής δραστηριότητας (RFCS, 2020).

Λαμβάνοντας υπόψη την λιθοστρωματογραφία της περιοχής, ορίστηκαν οι παρακάτω τεχνικογεωλογικές ενότητες (βλέπε Σχήμα 4.4) (RAFF, 2022):

Αποθέσεις (Dump)

NS – TV1: Πρόκειται για το ανώτατο στρώμα αποθέσεων και γενικά θεωρείται σταθερό αν και χαλαρό και δεν επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες. Μπορεί να θεωρηθεί αδιαπέρατος σχηματισμός. Συνολικά η απόθεση TV1 στις λεκάνες Most και Sokolon χαρακτηρίζεται από αύξηση της συνοχής με το βάθος.

TV2: Οι αποθέσεις των NS – TV1 και TV2 έχουν παρόμοιες τιμές στην γωνία εσωτερικής τριβής, με την διαφορά ότι το TV2 παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη τιμή συνοχής. Οι τιμές της συνοχής εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο CPT. Το συνολικό πάχος των NS – TV1 και TV2 διαφέρει ως προς τις εμφανίσεις ετερογενών υλικών, στις οποίες μπορεί να αναπτύσσονται υδροφορείς.

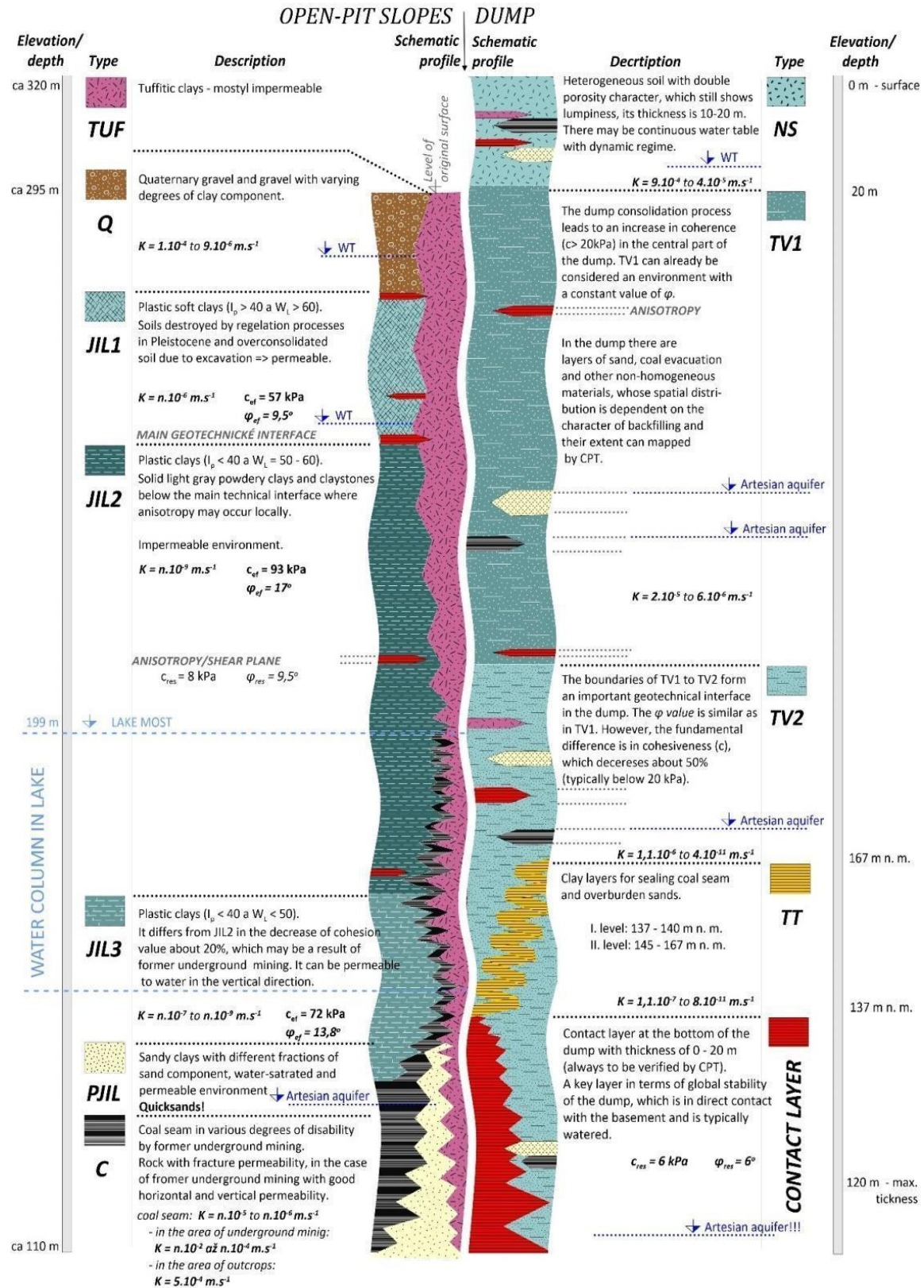
CONTACT LAYER: Πρόκειται για ένα στρώμα με χαλαρό υλικό στην περιοχή των αποθέσεων, ή για μια ζώνη αδυναμίας στην πλευρά των μόνιμων πρανών. Στη ζώνη αυτή μειώνεται η αντοχή των υπερκείμενων σχηματισμών στο μέγεθος της παραμένουσας αντοχής.

Μόνιμα Πρανή (Open-pit slopes)

QUARTENARY (Τεταρτογενή ιζήματα): αποτελούνται κυρίως από άργιλο, χαλίκια, αμμοχάλικο και λίθους. Έχουν αρκετό πάχος σε κάποιες περιοχές. Οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από τα χαλίκια και τα αμμοχάλικα.

JIL1: Πρόκειται για γκρίζα-καφέ καολινοϊλιθικά αργιλικά πετρώματα, δηλαδή, εδάφη MH έως CH, αργίλους και πηλούς με δείκτη πλαστικότητας $PI = 40$. Το στρώμα αυτό παρουσιάζει στρωμάτωση με κλίση και παρουσία μικρών και μεγάλων ρωγμών. Αποτελεί το κυρίαρχο τμήμα των βορειοδυτικών πρανών της λίμνης.

MAIN GEOTECHNICAL UNITS AND SOIL TYPES



Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της περιοχής (RAFF, 2022).

JIL2: Πρόκειται για αργίλους με δείκτη πλαστικότητας $PI = 40$. Χαρακτηρίζονται ως F7 (MH) – F8 (CH) με χαρακτήρα ημίβραχου. Η συνοχή τους αυξάνεται αναλογικά με το βάθος. Ο σχηματισμός αυτός συχνά καλύπτεται από αποθέσεις της εκμετάλλευσης σχηματίζοντας μια επιφάνεια αδυναμίας.

JIL3: Πρόκειται για αργίλους σε βάθος 80 – 120 m πάνω από το στρώμα του άνθρακα. Διαφέρουν από τους άλλους αργιλικούς σχηματισμούς λόγω της μειωμένης διατμητικής αντοχής κατά περίπου 20%. Συνήθως έχουν πάχος 20 m. Ο **JIL3** είναι ένας γεωτεχνικός σχηματισμός που εμφανίζεται σε πολύ μικρή έκταση στον πυθμένα της λίμνης χωρίς να εντοπίζεται σε κάποιο πρανές.

PJIL: Πρόκειται για αργιλικούς και αμμώδεις σχηματισμούς της εποχής του Μειοκαίνου με λεπτές στρώσεις άνθρακα. Αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στους λόφους Κοčičí και Hněvín σχηματίζοντας το πρανές της λίμνης.

Υπόβαθρο

OVERLAY – SEAM STRATA – UNDERLAY (Εναλλαγές λιγνίτη): Πρόκειται για εναλλαγές άνθρακα με διαφορετικό βαθμό κερματισμού, με αργιλικούς και αμμώδεις σχηματισμούς.

VOLCANIC (Τριτογενή ηφαιστειακά πετρώματα): Συνήθως εμφανίζονται με μορφή αργίλων παρά τόφφων. Εμφανίζονται βαθύτερα και έχουν το χαρακτήρα βράχου έως ημίβραχου με πιθανά μεγάλη διαπερατότητα λόγω ρωγμών. Οι αργιικοί τόφφοι εμφανίζονται στο υπόβαθρο της λίμνης. Αποτελούν μεγάλο μέρος του πρανούς της λίμνης στο λόφο Κοčičí.

CRETACEOUS (Σχηματισμοί του Κρητιδικού): Ο σχηματισμός αποτελείται από υπολείμματα κρητιδικών ιζημάτων (π.χ. μάργα, αργλική μάργα) και ασβεστόλιθο. Πρόκειται για ιζήματα με σημαντικό πάχος (δεκάδες μέτρα) που εμφανίζονται στα ανατολικά και τα βόρεια τμήματα της περιοχής μελέτης (προς το ορυχείο Bílina).

PROTEROZOIC (Σχηματισμοί του Πρωτοζωϊκού): Το υπόστρωμα αποτελείται από βιοιτικό – μοσχοβιτικό γνεύσιο, με εξαίρεση τις ανατολικές και νοτιοανατολικές πλαγιές του λόφου Hněvín, όπου ένα τεράστιο τμήμα του σχηματισμού καλύπτει υπερκείμενους

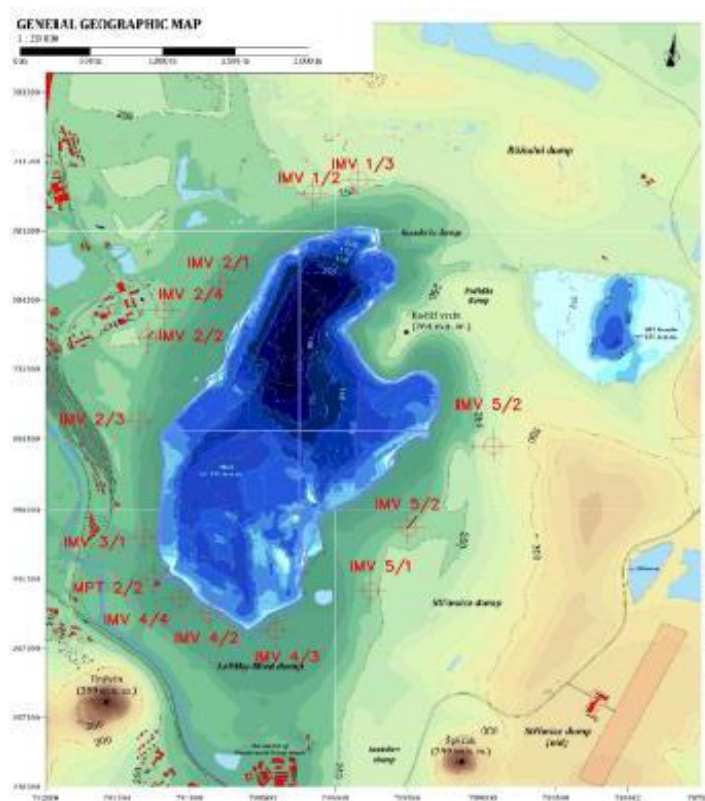
σηματισμούς, οι οποίοι αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας.

4.4. Υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή

Γύρω από την λίμνη Most έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες για την εξακρίβωση των υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.

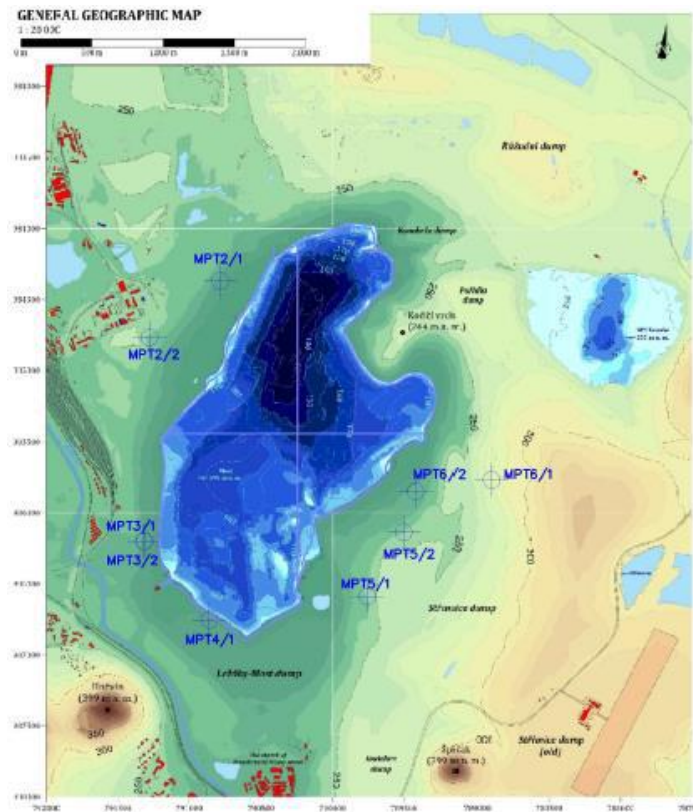
Στο πλαίσιο των απαιτήσεων του έργου RAFF (Risk Assessment of Final Pits During Flooding), πραγματοποιήθηκαν ερευνητικές γεωτρήσεις και δοκιμές πεδίου για την αξιολόγηση των γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών που αναπτύσσονται στις διάφορες τεχνικογεωλογικές μονάδες.

Επιπλέον, στην περιοχή εγκαταστάθηκαν 14 κλισίμετρα (σημεία ελέγχου) σε γεωτρήσεις στις όχθες της λίμνης Most για τον έλεγχο της κινητικότητας των πρανών (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Θέσεις κλισιμέτρων στην περιοχή γύρω από τη λίμνη Most (RAFF, 2022).

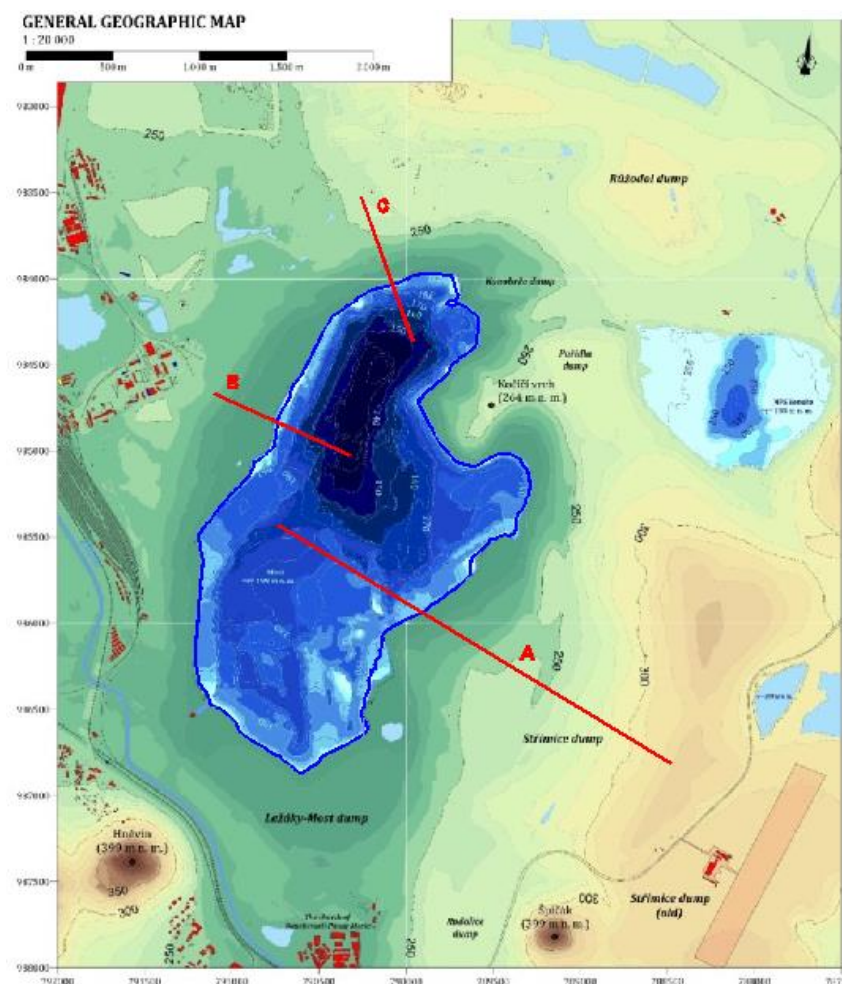
Επίσης, σε διάφορα βάθη πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της πίεσης των πόρων με την βοήθεια πιεζόμετρων που εγκαταστάθηκαν σε επιλεγμένες γεωτρήσεις (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Θέσεις εγκατάστασης πιεζομέτρων στη περιοχή γύρω από τη λίμνη Most (RAFF, 2022).

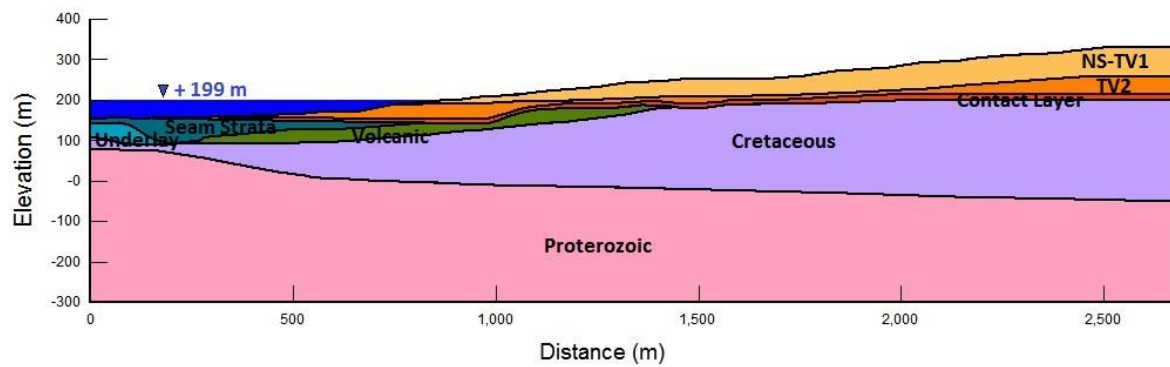
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ MOST

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η ευστάθεια των πρανών της τεχνητής λίμνης Most, στην Τσεχία, στις θέσεις A, B, και C, όπως αυτές ορίζονται στο Σχήμα 5.1.

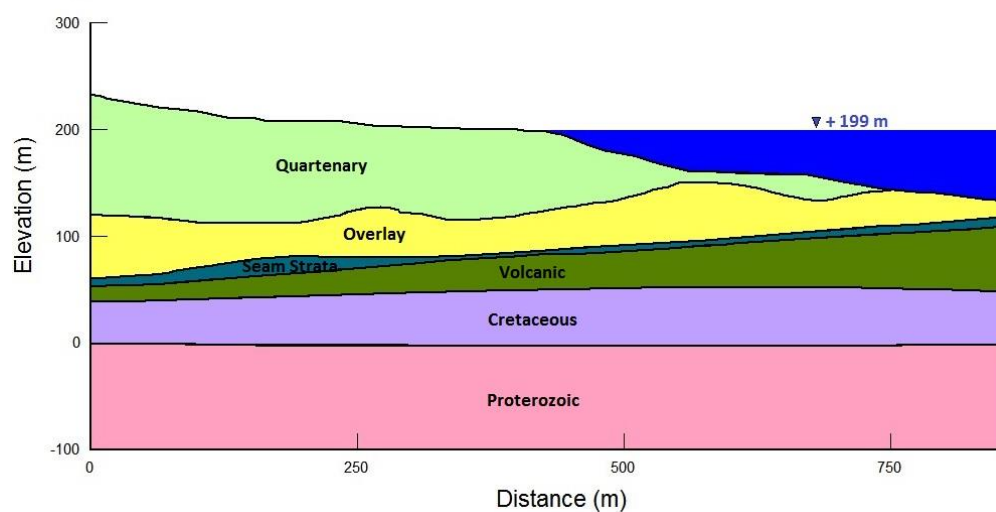


Σχήμα 5.1: Θέσεις τομών στην λίμνη Most.

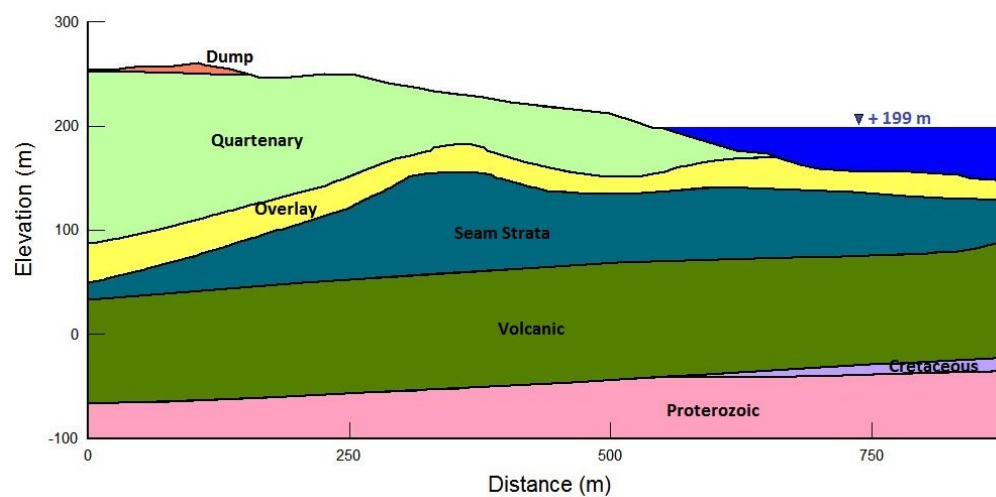
Οι τομές αυτές σχεδιάστηκαν εγκάρσια στα πρηνή με βάση την λιθολοστρωματογραφία της περιοχής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3 (RAFF, 2022) και φαίνονται στα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4. Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται στις τομές αυτές έχουν αναλυθεί στην ενότητα 4.3 του προηγούμενου κεφαλαίου (βλέπε και Σχήμα 5.5).



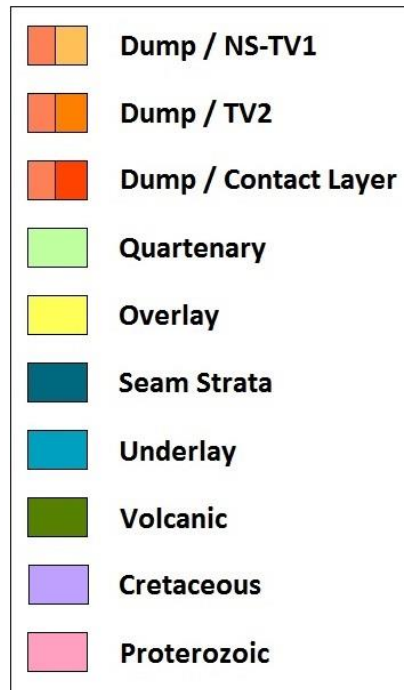
Σχήμα 5.2: Τομή Α.



Σχήμα 5.3: Τομή Β.



Σχήμα 5.4: Τομή Γ.



Σχήμα 5.5: Τεχنيκογεωλογικές ενότητες στις τομές Α, Β και Γ (Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4, αντίστοιχα), από την στρωματογραφικά ανώτερη προς την στρωματογραφικά κατώτερη.

Η ανάλυση των παραπάνω τομών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού GeoStudio 2019 R2 της GEOSLOPE International Ltd και τα προγράμματα SEEP/W (για την κατανομή των πιέσεων νερού των πόρων) και SLOPE/W (για την ανάλυση ευστάθειας πρανών).

Οι αρχικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα μοντέλα των τριών τομών (Α, Β και Γ) αφορούν συνθήκες σταθερής ροής (Steady State) με σταθερή (Constant) τη στάθμη του νερού της λίμνης, στα + 199 m.

Τα σενάρια που επιλύθηκαν είναι τα εξής (Πίνακας 5.1):

- 1) Ταπείνωση της στάθμης του νερού της λίμνης κατά 5 m με ρυθμό 0.178 m/d, 0.03 m/d και 0.008 m/d.
- 2) Ταπείνωση της στάθμης του νερού της λίμνης κατά 10 m με ρυθμό 0.178 m/d, 0.03 m/d και 0.008 m/d.
- 3) Αυξομείωση της στάθμης του νερού της λίμνης \pm 60 cm με ρυθμό 0.03 m/d και διαφορετικό αριθμό διακυμάνσεων ίσο με 2, 32 και 128.

Πίνακας 5.1: Σενάρια μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης στο μοντέλο της τομής Α με Contact Layer.

Σενάριο		Περίπτωση	
1	Ταπείνωση στάθμης λίμνης κατά 5 m	α	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.178 m/d (Χρόνος \approx 28 ημέρες)
		β	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.03 m/d (Χρόνος \approx 167 ημέρες)
		γ	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.008 m/d (Χρόνος \approx 625 ημέρες)
2	Ταπείνωση στάθμης λίμνης κατά 10 m	α	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.178 cm/d (Χρόνος \approx 56 ημέρες)
		β	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.03 m/d (Χρόνος \approx 333 ημέρες)
		γ	Ρυθμός ταπείνωσης = 0.008 m/d (Χρόνος = 1250 ημέρες)
3	Αυξομείωση στάθμης λίμνης κατά \pm 60 cm με ρυθμό: 0.03 m/d	α	Αριθμός διακυμάνσεων = 2 (Χρόνος = 2000 ημέρες)
		β	Αριθμός διακυμάνσεων = 32 (Χρόνος = 2000 ημέρες)
		γ	Αριθμός διακυμάνσεων = 128 (Χρόνος = 2000 ημέρες)

5.1. Θεωρήσεις και παραδοχές

Σε όλα τα μοντέλα θεωρήθηκε ότι τα γεωλογικά στρώματα είναι ομογενή και ισότροπα. Η διερεύνηση της κατανομής των πιέσεων του νερού για την ακόρεστη ζώνη βασίστηκε στη θεωρία του Van Genuchten και χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SEEP/W (βλέπε κεφ. 2).

Για την ανάλυση ευστάθειας των πρανών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SLOPE/W). Επιλέχθηκε το καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb σε όλες τις τεχνικογεωλογικές ενότητες και για την ανάλυση οριακής ισορροπίας θεωρήθηκε ότι η καταλληλότερη μέθοδος (λωρίδων) είναι αυτή των Morgenstern – Price (κεφ. 3).

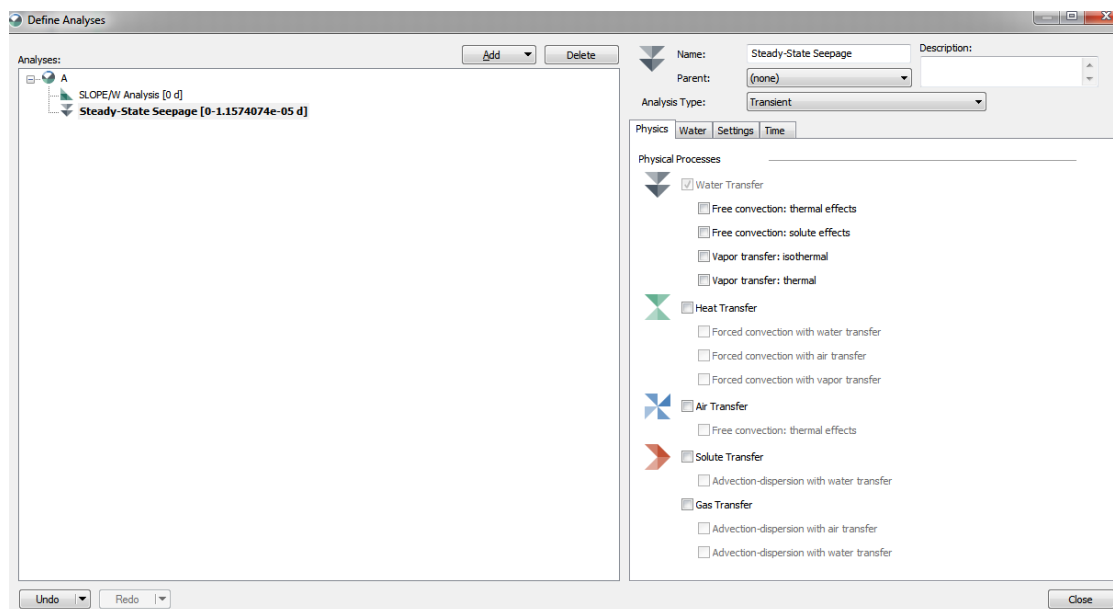
5.2. Κατανομή πίεσης του νερού των πόρων (SEEP/W)

Για την διερεύνηση της κατανομής των πιέσεων του νερού των πόρων χρησιμοποιήθηκε το 2D πρόγραμμα SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

5.2.1. Σχεδιασμός μοντέλου

Μέσω των εντολών Define → Analyses επιλέγεται ο τύπος της ροής (σταθερή = Steady-State).

Σημειώνεται ότι για τα διάφορα σενάρια μεταβατικής ροής που εξετάστηκαν (ενότητα 5.5) επιλέχθηκε η εντολή «Transient», όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, και στο πεδίο «Time» ορίστηκε η ημέρα έναρξης, η διάρκεια και τα βήματα της ανάλυσης.



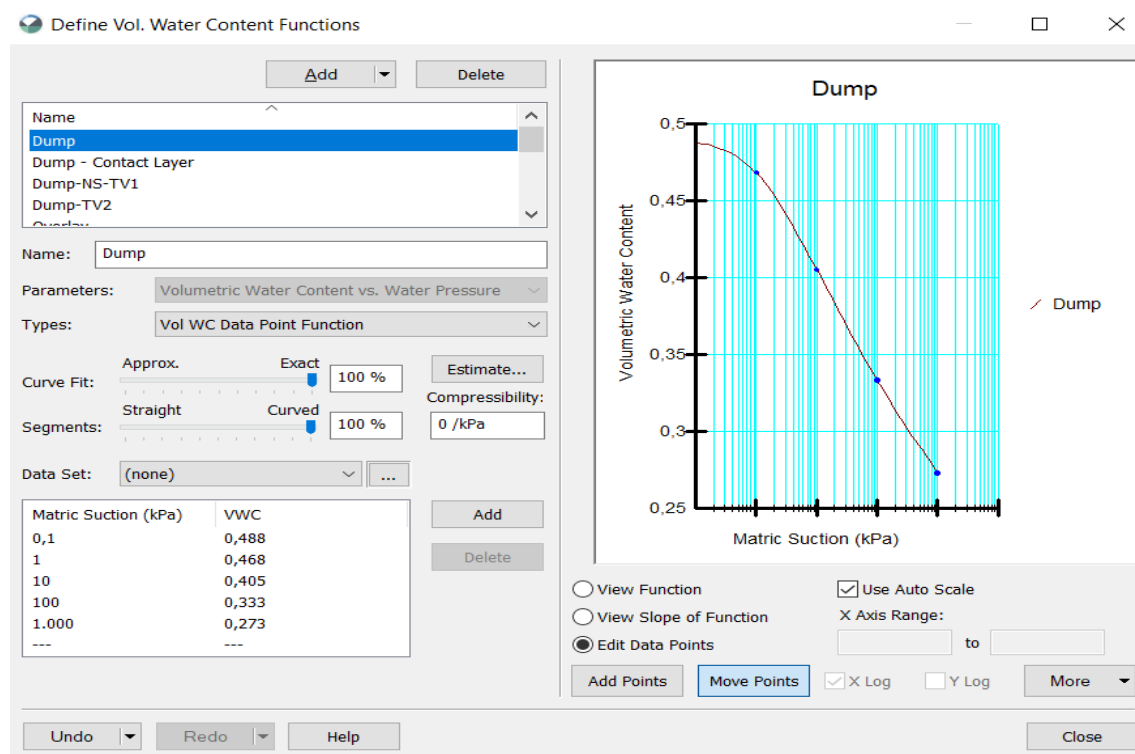
Σχήμα 5.7: Καθορισμός τύπου ροής στο SEEP/W.

Στη συνέχεια, οι τεχνικογεωλογικές ενότητες των τριών τομών (Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4) εισάγονται στο πρόγραμμα SEEP/W είτε απευθείας από το AutoCAD με τις εντολές File → Import Regions, είτε μέσω των εντολών Sketch → Lines (για την χάραξη του περιγράμματος) και Draw → Regions (για τον ορισμό κάθε ενότητας).

5.2.2. Εισαγωγή υδραυλικών παραμέτρων

Οι υδραυλικές παράμετροι των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που απαιτούνται από το πρόγραμμα είναι η ογκομετρική υγρασία (Volumetric Water Content, VWC ή θ) και η υδροπερατότητα (Hydraulic Conductivity, k). Προκειμένου να εφαρμοσθεί η θεωρία του Van Genuchten για την ακόρεστη ζώνη, χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές Define → Hydraulic Functions → Vol. Water Content και Define → Hydraulic Functions → Hydraulic Conductivity.

Με τις παραπάνω εντολές τα ογκομετρική υγρασία (Volumetric Water Content VWC και η υδροπερατότητα k μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της μύζησης που αναπτύσσεται στους πόρους κάθε εδαφικού σχηματισμού (Matric Suction). Για την ογκομετρική υγρασία επιλέγεται τύπος συνάρτησης «Vol WC Data Point Function», εμφανίζεται πίνακας με στήλες «Matric Suction (kPa)» και «VWC» και δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει τιμές Matric Suction και VWC ώστε να επιτύχει την καταλληλότερη για την εκάστοτε τεχνικογεωλογική ενότητα σχέση (βλέπε Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Δημιουργία σχέσης μύζησης – ογκομετρικής υγρασίας στο SEEP/W.

Οι τιμές της ογκομετρικής υγρασίας (VWC) που εισήχθησαν στη συνάρτηση «Vol WC Data Point Function» υπολογίστηκαν με βάση τους τύπους του Van Genuchten (1980), όπως περιγράφονται στην ενότητα 2.2.2 (κεφ. 2) και φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις 2.19, 2.20 και 2.22, στις οποίες οι ογκομετρικές υγρασίες θ_{res} (παραμένει στο έδαφος ακόμα και σε υψηλά επίπεδα μύζησης) και θ_{sat} (σε συνθήκες πλήρους κορεσμού), όπως και οι παράμετροι g_a και g_h βρέθηκαν βιβλιογραφικά (RAFF, 2022), ανάλογα με τη σύσταση κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας.

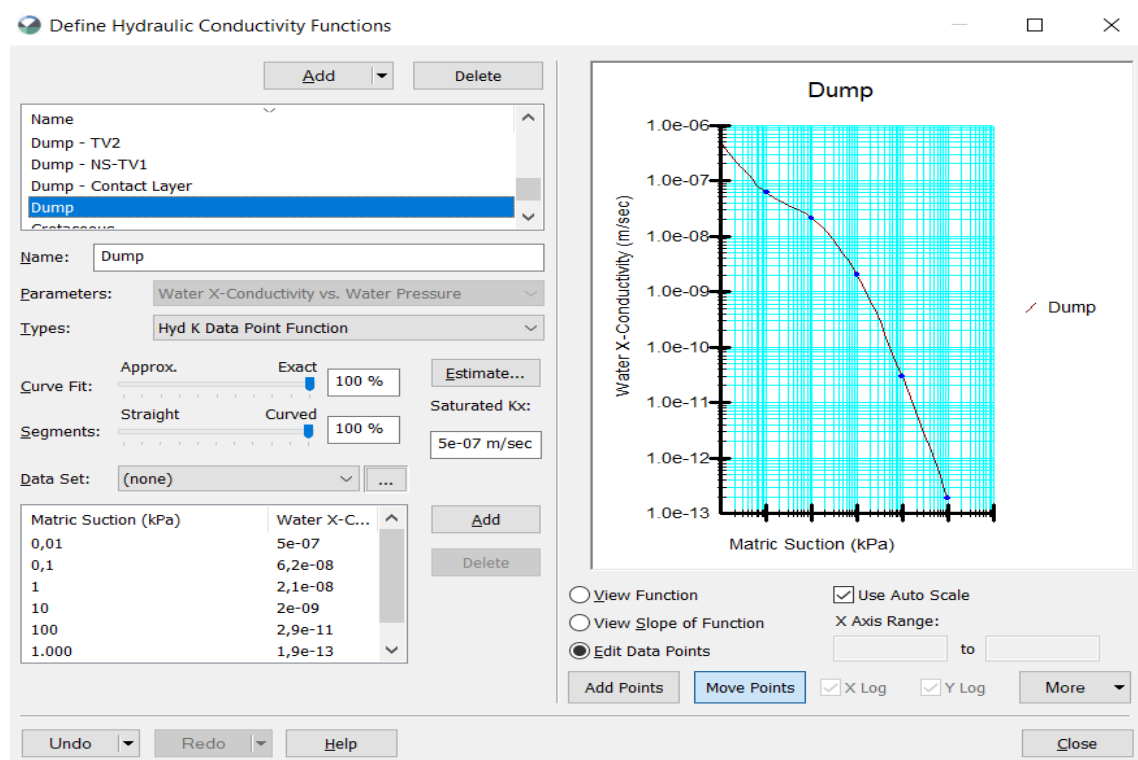
Πίνακας 5.2: Τιμές ογκομετρικής υγρασίας (VWC) στη συνάρτηση «Vol WC Data Point Function» στο SEEP/W.

Τεχν. ενότητα	$p_w = 0.1 \text{ kPa}$	$p_w = 1 \text{ kPa}$	$p_w = 10 \text{ kPa}$	$p_w = 100 \text{ kPa}$	$p_w = 1000 \text{ kPa}$
Dump	0.488	0.468	0.405	0.333	0.273
Ns – TV1	0.416	0.330	0.209	0.129	0.082
TV2	0.608	0.591	0.522	0.431	0.353
Contact Layer	0.517	0.496	0.430	0.354	0.289
Quaternary	0.448	0.430	0.373	0.308	0.253
Overlay	0.183	0.024	0.020	0.020	0.020
Seam Strata	0.325	0.078	0.023	0.016	0.015
Underlay	0.311	0.083	0.033	0.026	0.025
Volcanic	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cretaceous	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Proterozoic	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Σημειώνεται ότι η σχέση μύζησης και ογκομετρικής υγρασίας δύναται να δημιουργηθεί αυτόματα και από το ίδιο το πρόγραμμα, αν είναι γνωστή η συμπίεστικότητα του εδάφους (σε kPa) και το θ_{sat} . Τα αποτελέσματα που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές του Πίνακα 5.2.

Όμοια, επιλέγεται τύπος συνάρτησης «Hyd K Data Point Function» και εμφανίζεται πίνακας με στήλες «Matric Suction (kPa)» και «Water X-Cond (m/s)», στον οποίο εισάγονται οι ανάλογες τιμές (Σχήμα 5.9).

Οι τιμές της υδροπερατότητας (k) που εισήχθησαν στη συνάρτηση «Hyd K Data Point Function» υπολογίστηκαν από τις διαθέσιμες τιμές υδροπερατότητας σε κορεσμένες συνθήκες (RAFF, 2022), με βάση τη σχέση 2.23 του Van Genuchten (1980) και τις σχέσεις 2.21 και 2.22, όπως αυτές περιγράφονται στην ενότητα 2.2.2 (κεφ. 2). Οι τιμές αυτές δίνονται στον Πίνακα 5.3.

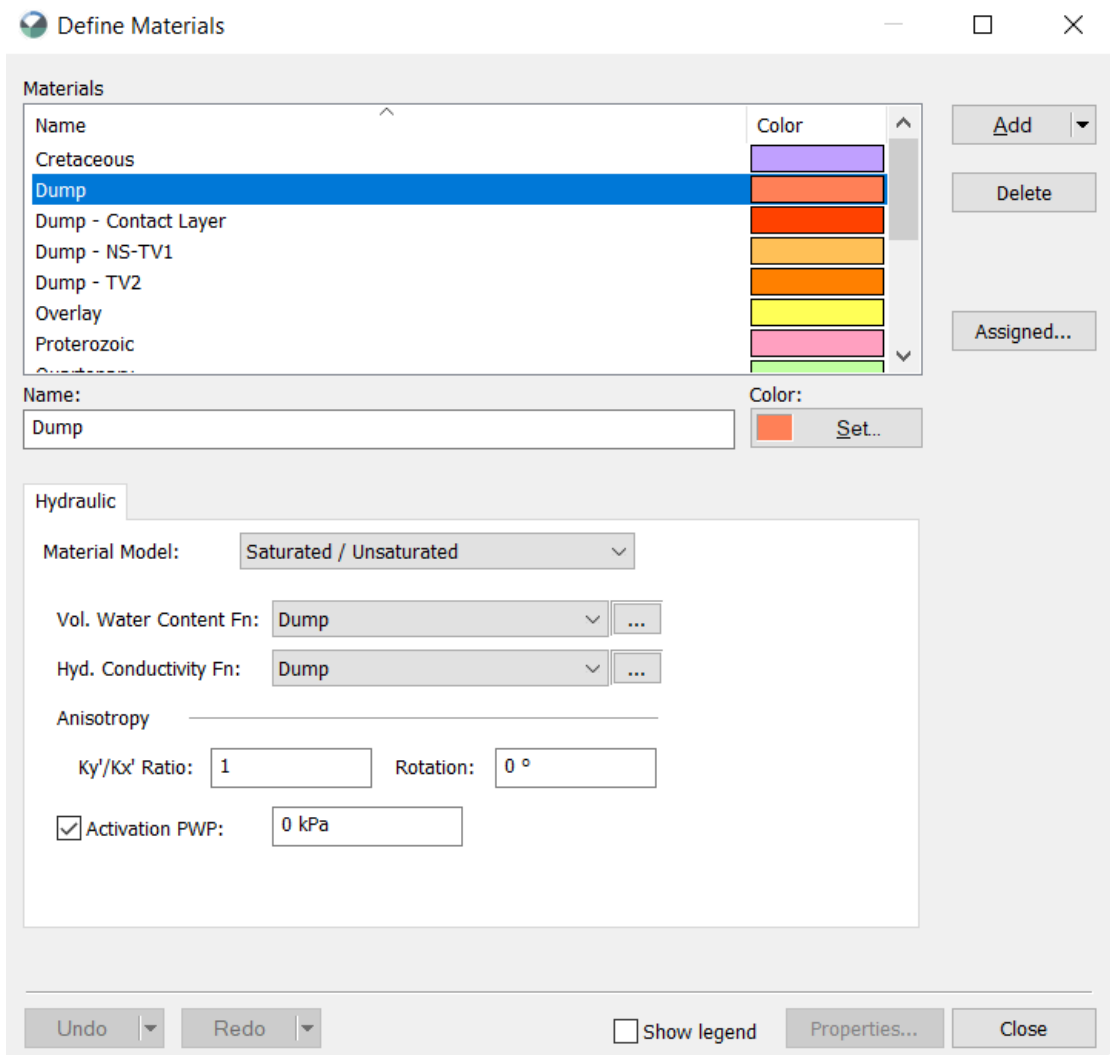


Σχήμα 5.9: Δημιουργία σχέσης μύζησης – υδροπερατότητας στο SEEP/W.

**Πίνακας 5.3: Τιμές υδροπερατότητας (k σε m/s) στη συνάρτηση «Hyd K Data Point Function»
στο *SEEP/W*.**

Τεχν. ενότητα	ksat (m/s)	$p_w = 0.1 \text{ kPa}$	$p_w = 1 \text{ kPa}$	$p_w = 10 \text{ kPa}$	$p_w = 100 \text{ kPa}$	$p_w = 1000 \text{ kPa}$
Dump	5.0×10^{-7}	6.2×10^{-8}	2.1×10^{-8}	2.0×10^{-9}	2.9×10^{-11}	1.9×10^{-13}
Ns – TV1	2.0×10^{-6}	6.3×10^{-7}	1.6×10^{-7}	3.7×10^{-9}	1.3×10^{-11}	3.6×10^{-14}
TV2	1.0×10^{-8}	1.40×10^{-9}	5.60×10^{-10}	7.80×10^{-11}	1.50×10^{-12}	1.10×10^{-14}
Contact Layer	1.0×10^{-7}	1.2×10^{-8}	4.2×10^{-9}	4.1×10^{-10}	5.7×10^{-12}	3.8×10^{-14}
Quaternary	1.0×10^{-7}	1.2×10^{-8}	4.2×10^{-9}	4.1×10^{-10}	5.7×10^{-12}	3.8×10^{-14}
Overlay	1.0×10^{-5}	9.2×10^{-5}	1.9×10^{-6}	2.2×10^{-12}	1.4×10^{-18}	8.8×10^{-25}
Seam Strata	1.0×10^{-5}	8.1×10^{-6}	1.2×10^{-6}	4.0×10^{-10}	2.4×10^{-14}	1.5×10^{-18}
Underlay	1.0×10^{-5}	8.1×10^{-6}	1.2×10^{-6}	4.0×10^{-10}	2.4×10^{-14}	1.5×10^{-18}
Volcanic	1.1×10^{-12}	1.1×10^{-12}	1.1×10^{-12}	1.1×10^{-12}	1.1×10^{-12}	1.1×10^{-12}
Cretaceous	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}
Proterozoic	1.2×10^{-14}	1.2×10^{-14}	1.2×10^{-14}	1.2×10^{-14}	1.2×10^{-14}	1.2×10^{-14}

Για τον ορισμό των ιδιοτήτων κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας (region) και την αντιστοίχιση των σχέσεων που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές Define → Materials (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10: Καθορισμός τεχνικογεωλογικών ενότητων και αντιστοίχιση σχέσεων μύζησης με ογκομετρική υγρασία και υδροπερατότητα στο SEEP/W.

Με τις εντολές αυτές:

α) Ορίζονται τα στρώματα (όνομα, χρώμα) και ο βαθμός κορεσμού τους (μόνο κορεσμένη ή κορεσμένη / ακόρεστη φάση). Επιλέχθηκε η κορεσμένη / ακόρεστη φάση σε όλες τις τεχνικογεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται στα πρανή της λίμνης και η κορεσμένη φάση για τις τρεις υποκείμενες στρωματογραφικά ενότητες (Volcanic, Cretaceous, Proterozoic).

β) Στα πεδία Vol. Water Content Fn και Hyd. Conductivity Fn επιλέγονται οι σχέσεις μύζησης – ογκομετρικής υγρασίας και μύζησης – υδροπερατότητας, αντίστοιχα, που δημιουργήθηκαν για την κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα.

5.2.3. Αρχικές συνθήκες

Προκειμένου να υπολογιστεί η υδραυλική και η κινητική συμπεριφορά του μοντέλου, προσομοιώθηκε η κατάσταση που αντιστοιχεί στην τελική πλήρωση της λίμνης Most με νερό.

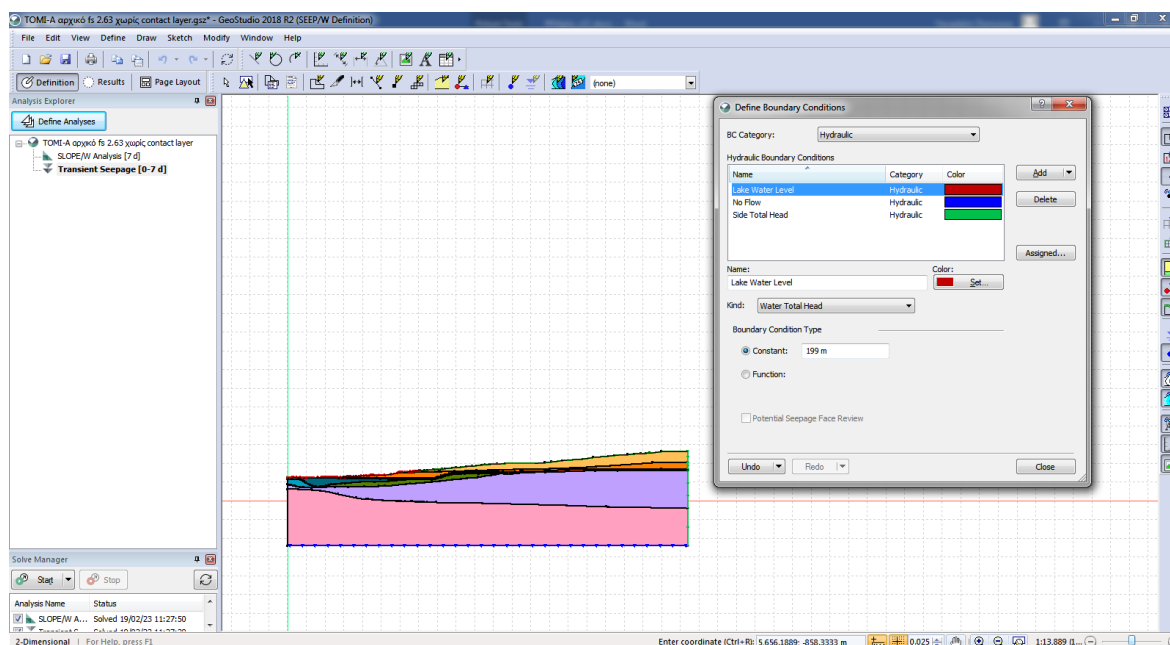
Η πλήρωση της λίμνης άρχισε στις 24 Οκτωβρίου 2008. Το νερό που συσσωρεύτηκε προέρχονταν από βροχοπτώσεις και πηγές στα πρανή του ορυχείου. Η αρχική στάθμη του νερού ήταν στα +145.12 m και η τελική στάθμη φτάνει σήμερα στα +199.14 m.

Έτσι, ως αρχική συνθήκη ροής για το μοντέλο θεωρήθηκε η στάθμη της επιφάνειας της λίμνης (+199 m) (βλέπε και Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4).

Η στάθμη του νερού της λίμνης ορίζεται χρησιμοποιώντας τις εντολές Draw → Boundary Conditions → Define. Στο πεδίο «Kind» επιλέγεται «Water Total Head» και ορίζεται το όνομα της κατάστασης (στάθμη λίμνης/ «Lake Water Level»). Στη συνέχεια, ορίζεται η αρχική στάθμη του νερού της λίμνης (+199) επιλέγοντας «Constant» στο πεδίο «Boundary Condition Type».

Σημειώνεται ότι στα σενάρια επίλυσης κατά τα οποία η στάθμη της λίμνης μεταβάλλεται (βλέπε ενότητα 5.5), χρησιμοποιείται η επιλογή «Function» αντί της «Constant».

Η παραπάνω συνθήκη σχεδιάστηκε στον πυθμένα της λίμνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11 με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 5.11: Καθορισμός αρχικής στάθμης νερού της λίμνης στο SEEP/W (Τομή Α).

5.2.4. Οριακές συνθήκες

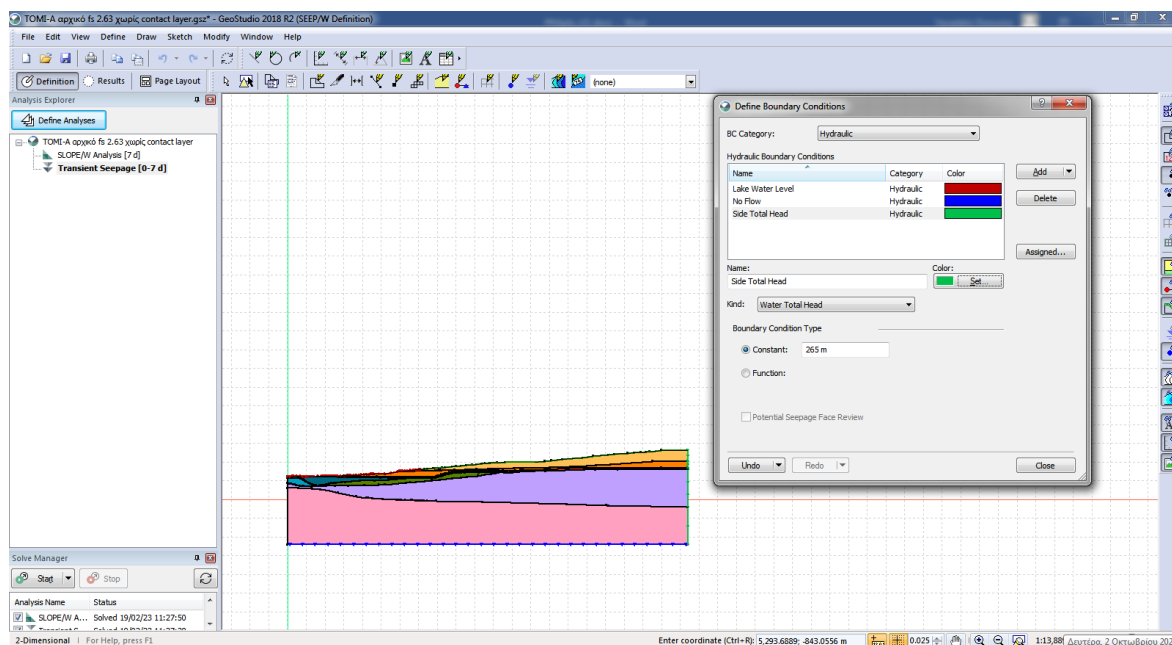
Με βάση την αρχική στάθμη νερού της λίμνης (+199 m), η υδραυλική κλίση στην περιοχή των αποθέσεων κυμαίνεται από 0.05 έως 0.07 (δεξί όριο), ενώ στην περιοχή των μόνιμων πρανών (αριστερό όριο) ορίστηκε από 0.01 έως 0.03 (RAFF, 2022).

Οι προαναφερόμενες υδραυλικές κλίσεις ορίστηκαν από υδραυλικό φορτίο ίσο με +265 m στην δεξιά πλευρά της τομής Α, +205 m στην αριστερή πλευρά της τομής Β και +240 m στην αριστερή πλευρά της τομής C. Οι τιμές αυτές τεκμηριώνονται από δεδομένα των εγκατεστημένων πιεζομέτρων στην περιοχή, (βλέπε κεφ. 4, Σχήμα 4.7 (RAFF, 2022)).

Ο ορισμός αυτής της συνθήκης έγινε όμοια με τον προηγούμενο που αφορούσε την στάθμη του νερού της λίμνης. Χρησιμοποιούνται οι εντολές Draw → Boundary Conditions → Define. Στο πεδίο «Kind» επιλέγεται «water total head» και ορίζεται το όνομα της κατάστασης (υδραυλικό φορτίο, επιλέχθηκε το όνομα «Side Total Head»). Στη συνέχεια στο πεδίο «Constant» επιλέγεται το κατάλληλο σταθερό υδραυλικό φορτίο.

Σημειώνεται ότι σε όλα τα σενάρια που επιλύθηκαν (ενότητες 5.4 και 5.5), θεωρήθηκε ότι το υδραυλικό φορτίο στα πλευρικά όρια του μοντέλου δεν μεταβάλλεται.

Η παραπάνω συνθήκη σχεδιάστηκε πλευρικά του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 με πράσινο χρώμα.



Σχήμα 5.12: Καθορισμός οριακών συνθηκών στο SEEP/W (Τομή Α).

Ως επιπλέον οριακή συνθήκη ορίστηκε και αυτή της «μη ροής» (No Flow) στο κάτω μέρος του μοντέλου (βλέπε Σχήμα 5.12 με μπλε χρώμα), ώστε, προκειμένου να αποτρέπονται τυχόν κατακόρυφες ροές από και προς το μοντέλο.

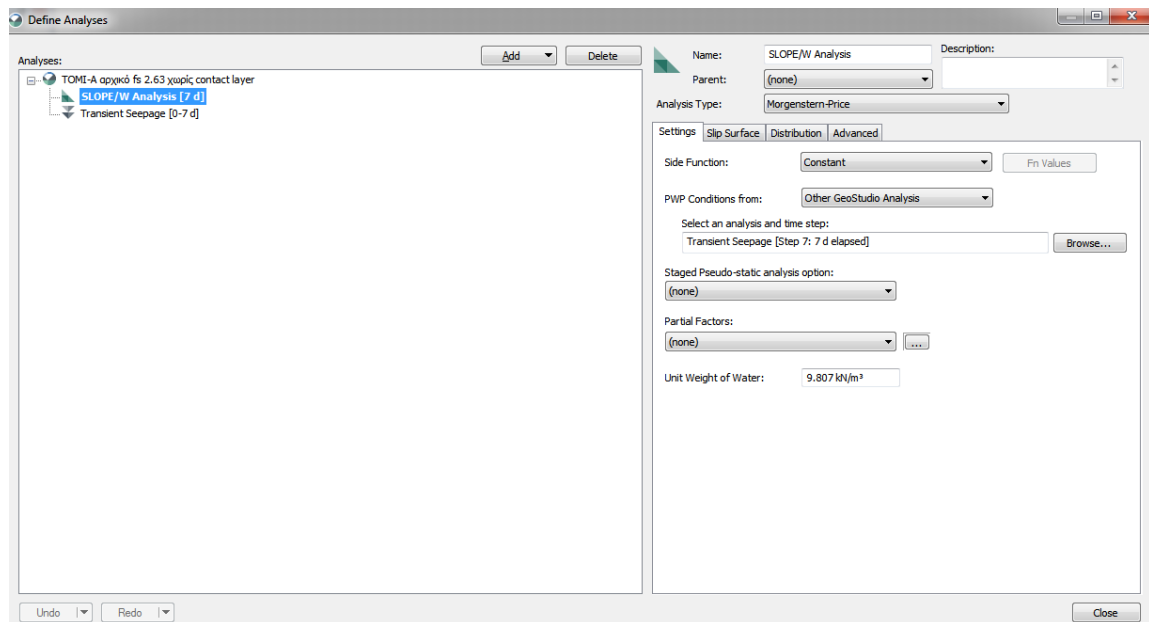
5.3. Ανάλυση ευστάθειας πρανών (SLOPE/W)

Για την ανάλυση της ευστάθειας των εδαφικών πρανών χρησιμοποιήθηκε το 2D πρόγραμμα οριακής ισορροπίας SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2015).

5.3.1. Σχεδιασμός μοντέλου και παράμετροι ανάλυσης

Το πρόγραμμα SLOPE/W συνδέεται απευθείας με το λογισμικό SEEP/W και θεωρεί στην επίλυση τα δεδομένα σχετικά με την γεωμετρία των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, που παρουσιάστηκε στα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4.

Με τις εντολές Define → Analyses επιλέγεται η μέθοδος λωρίδων με την οποία θα γίνει η ανάλυση οριακής ισορροπίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13, επελέγη η μέθοδος Morgenstern – Price.



Σχήμα 5.13: Καθορισμός μεθόδου ανάλυσης στο SLOPE/W.

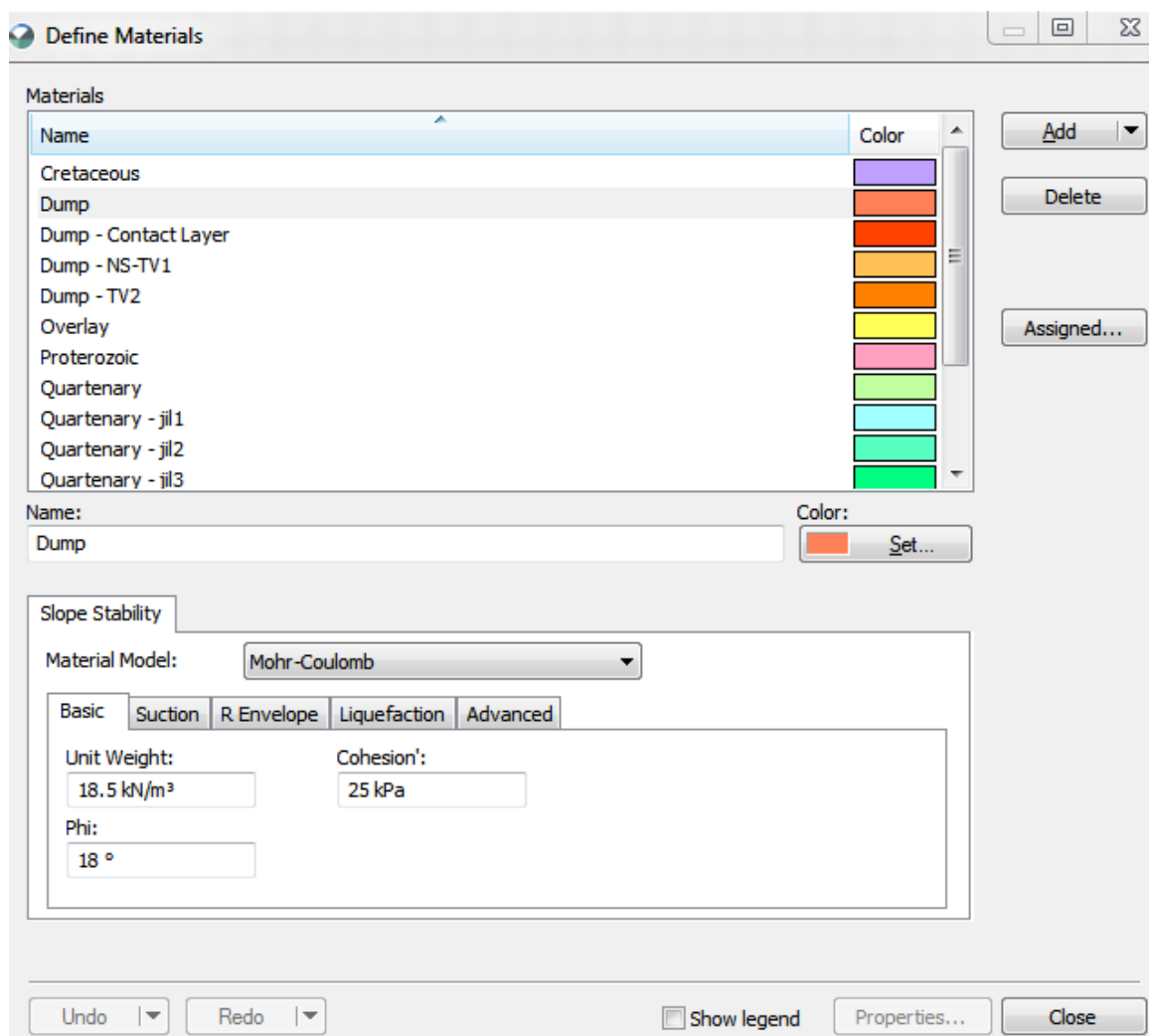
Στο πεδίο «Settings» μπορούν να καθοριστούν (βλέπε Σχήμα 5.13):

- α) ο τύπος της ανάλυσης οριακής ισορροπίας (πεδίο «Side Function»). Επιλέχθηκε σταθερή ανάλυση («Constant»), και
- β) η πηγή από την οποία το μοντέλο θα αντλεί δεδομένα πίεσης πόρων (πεδίο «PWP Conditions from»). Επιλέγοντας «Other GeoStudio Analysis», ορίζονται στο SLOPE/W οι πιέσεις του νερού των πόρων που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου στο SEEP/W.

Σημειώνεται ότι για τις επιλύσεις μεταβατικής ροής (ενότητα 5.5), στο SLOPE/W ορίσθηκαν οι πιέσεις του νερού των πόρων που προέκυψαν από την επίλυση του τελευταίου βήματος του ανάλογου μοντέλου στο SEEP/W.

5.3.2. Εισαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων

Οι γεωτεχνικές παράμετροι των ενοτήτων που απαιτούνται για την επίλυση είναι το μοναδιαίο βάρος (Unit Weight, γ), η συνοχή (Cohesion, c) και η γωνία εσωτερικής τριβής (Φ , ϕ). Οι τιμές αυτών των παραμέτρων εισήχθησαν στα μοντέλα χρησιμοποιώντας τις εντολές Define \rightarrow Materials (Σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.14: Εισαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων στις τεχνικογεωλογικές ενότητες στο SLOPE/W.

Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν βιβλιογραφικά (RAFF, 2022) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Τιμές μοναδιαίου βάρους (γ), συνοχής (c) και γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) στο *SLOPE/W*.

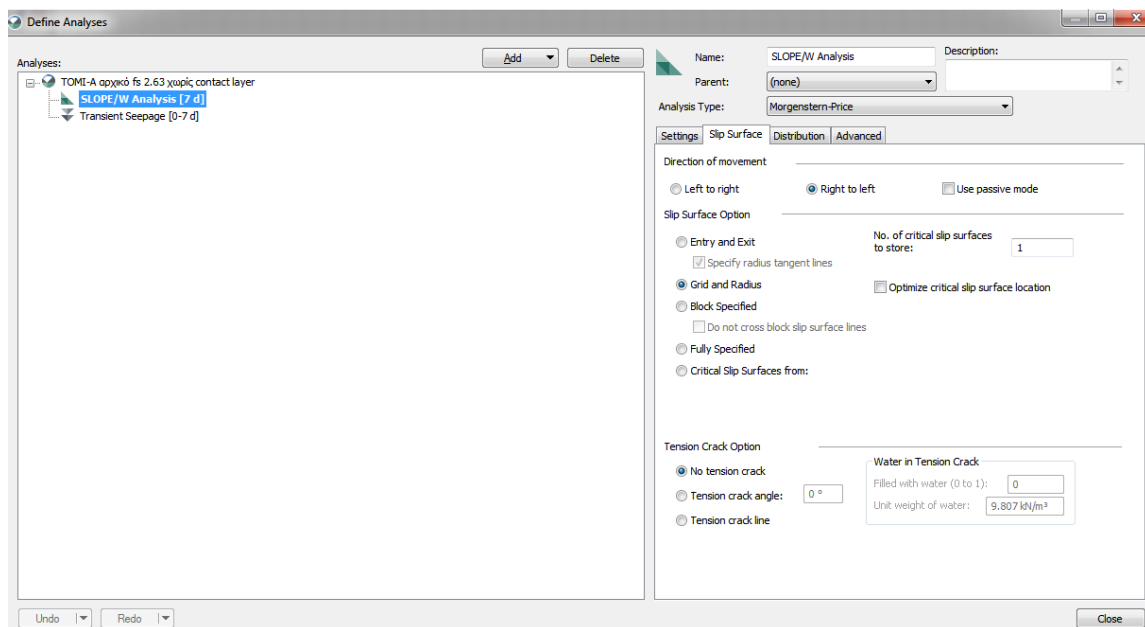
Τεχν. ενότητα	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	Συνοχή, c (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)
Dump	18.5	25	18
Ns – TV1	19.3	21.8	18.47
TV2	20	18	20
Contact Layer	20	8	8
Quaternary	22	70	15
Overlay	15	50	30
Seam Strata	18	50	35
Underlay	20	8	9.5
Volcanic	23	500	25
Cretaceous	25	-	-
Proterozoic	25	-	-

Σημειώνεται ότι σε όλες τις ενότητες επελέγη το καταστατικό μοντέλο *Mohr-Coulomb* (βλέπε Σχήμα 5.14), εκτός των δύο κατώτερων στρωμάτων (*Cretaceous* και *Proterozoic*) των οποίων η συμπεριφορά ορίσθηκε με το μοντέλο «*High Strength*».

Η αντιστοίχιση των παραπάνω ιδιοτήτων (properties) στις τεχνικογεωλογικές ενοότητες (regions) έγινε με τη χρήση της εντολής Draw → Materials.

5.3.3. Παράμετροι ανάλυσης

Με τις εντολές Define → Analyses, στο πεδίο «Slip Surface» (Σχήμα 5.15) επελέγη η κατεύθυνση της ολίσθησης και η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας.



Σχήμα 5.15: Καθορισμός παραμέτρων ολίσθησης στο SLOPE/W.

Η κατεύθυνση της ολίσθησης (πεδίο «Direction of movement») θεωρήθηκε από δεξιά προς τα αριστερά (Right to left) για τα μοντέλα της τομής Α και από αριστερά προς τα δεξιά (Left to right) για τα μοντέλα των τομών Β και C (βλέπε Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4).

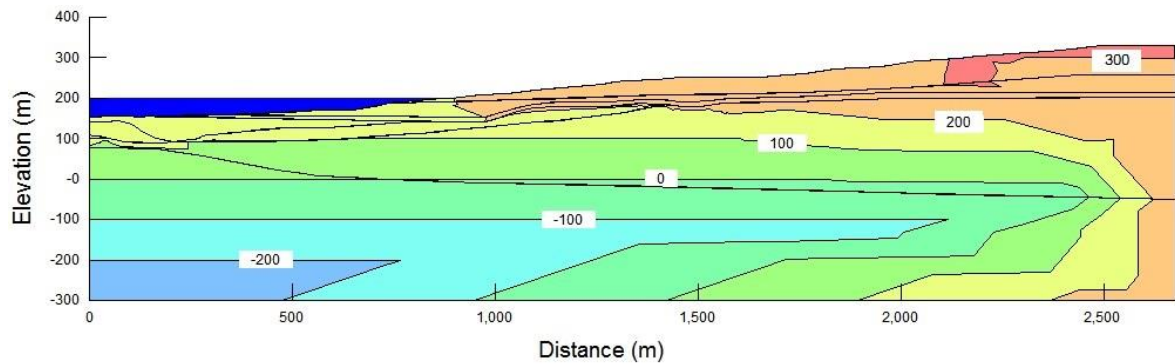
Όσον αφορά τη γεωμετρία της αστοχίας, αυτή θεωρήθηκε ως μια απλοποιημένη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ορίστηκε με την επιλογή «Grid and Radius» στο πεδίο «Slip Surface Option».

5.4. Επιλύσεις σταθερής ροής και αποτελέσματα

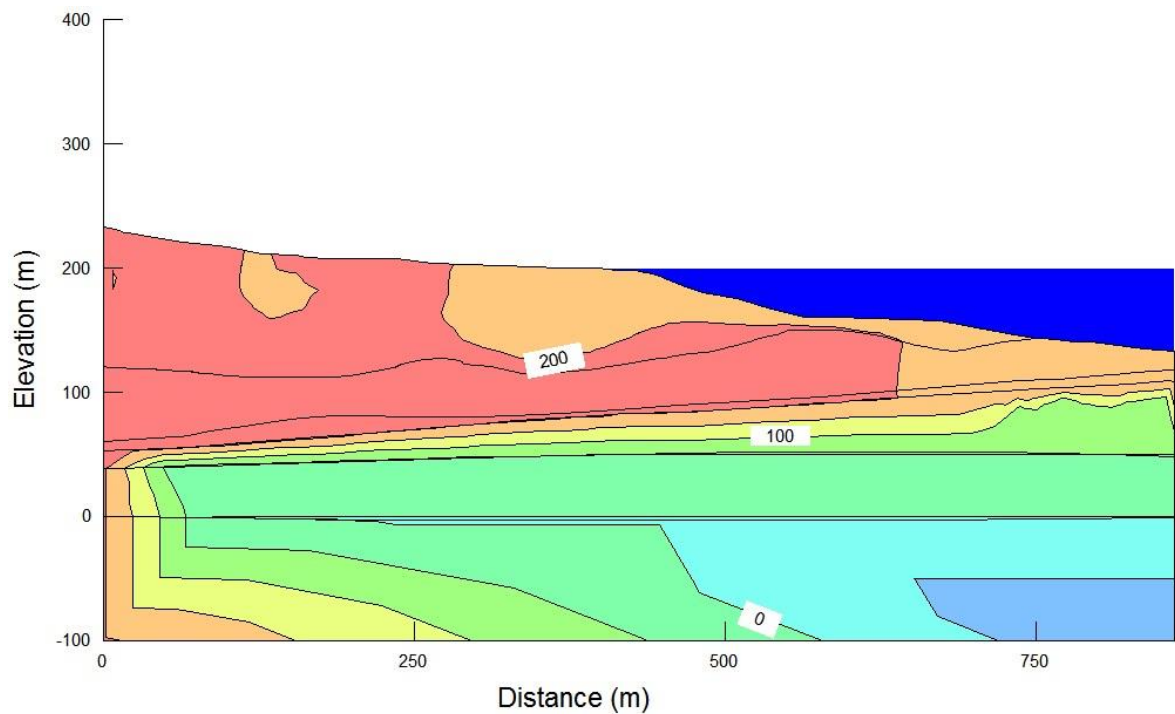
Ειδικά για την τομή Α επιλύθηκαν δύο περιπτώσεις, με και χωρίς την τεχνικογεωλογική ενότητα «Contact Layer», καθώς η ύπαρξη του στρώματος δεν επιβεβαιώνεται με σαφήνεια (Raff, 2022).

Στο πρόγραμμα SEEP/W, η επίλυση του μοντέλου πραγματοποιείται στο πεδίο «Solve Manager» με την εντολή «Start». Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν την κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων (Pore Water Pressure, PWP σε m), όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.16, 5.17 και 5.18.

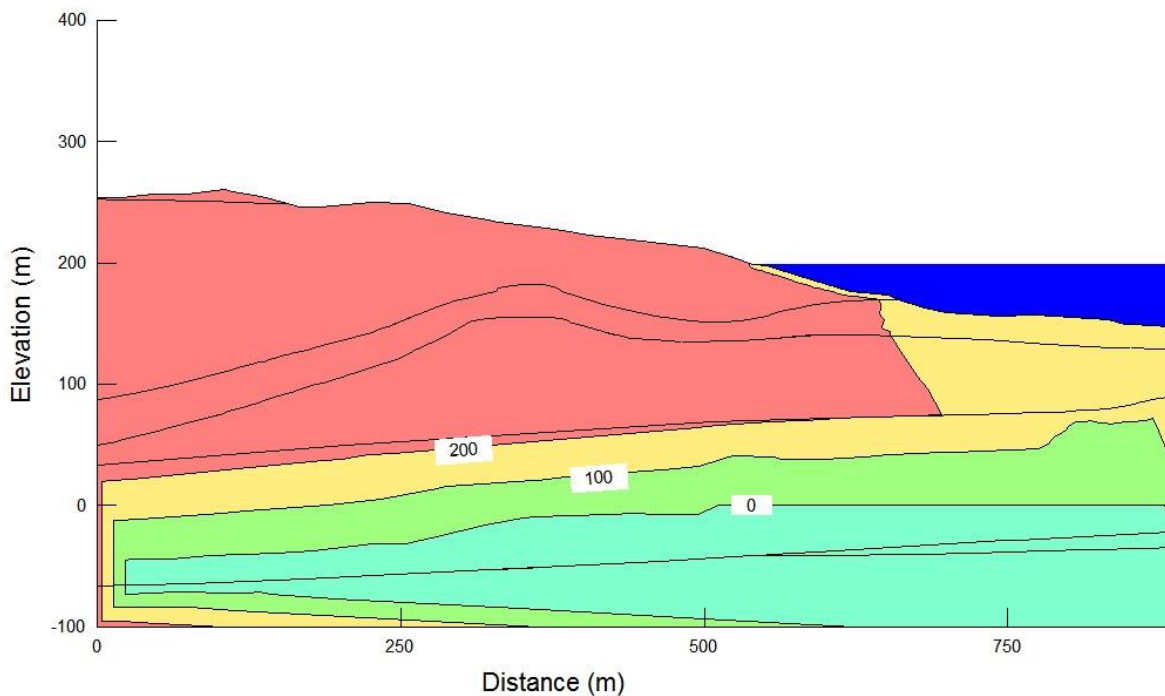
Σημειώνεται ότι για την περίπτωση του μοντέλου της τομής A χωρίς το *Contact Layer*, η κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων δεν διαφέρει ουσιαστικά από την επίλυση θεωρώντας την ύπαρξη του *Contact Layer* (Σχήματος 5.16).



Σχήμα 5.16: SEEP/W – Τομή A: Κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων (σε m).



Σχήμα 5.17: SEEP/W – Τομή B: Κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων (σε m).

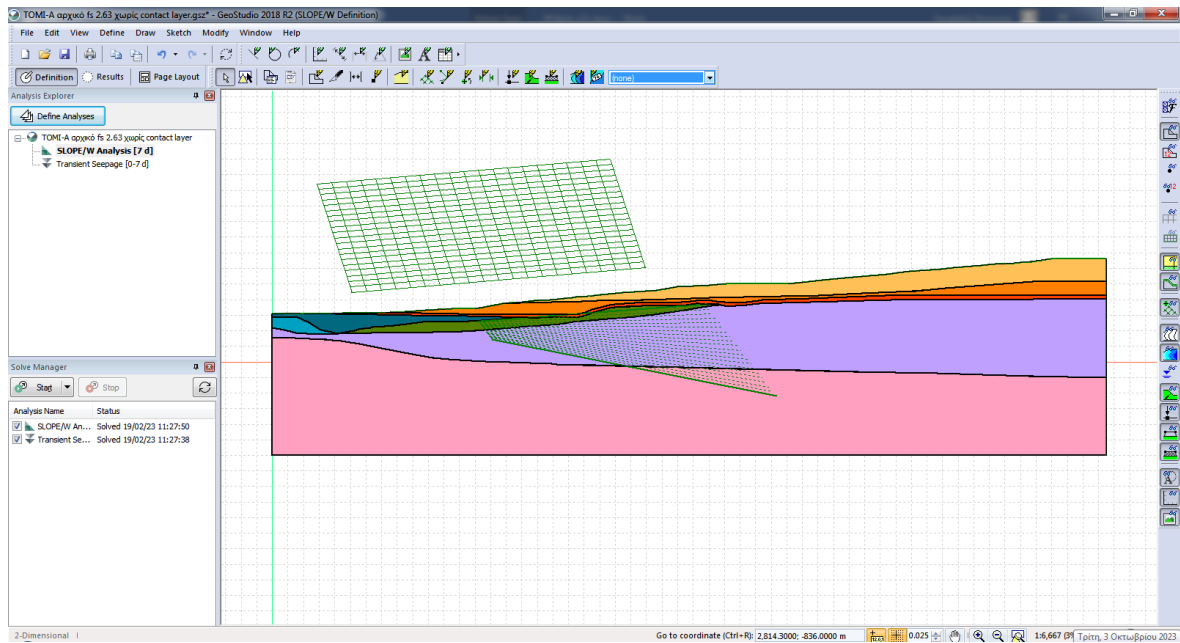


Σχήμα 5.18: SEEP/W – Τομή C: Κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων (σε m).

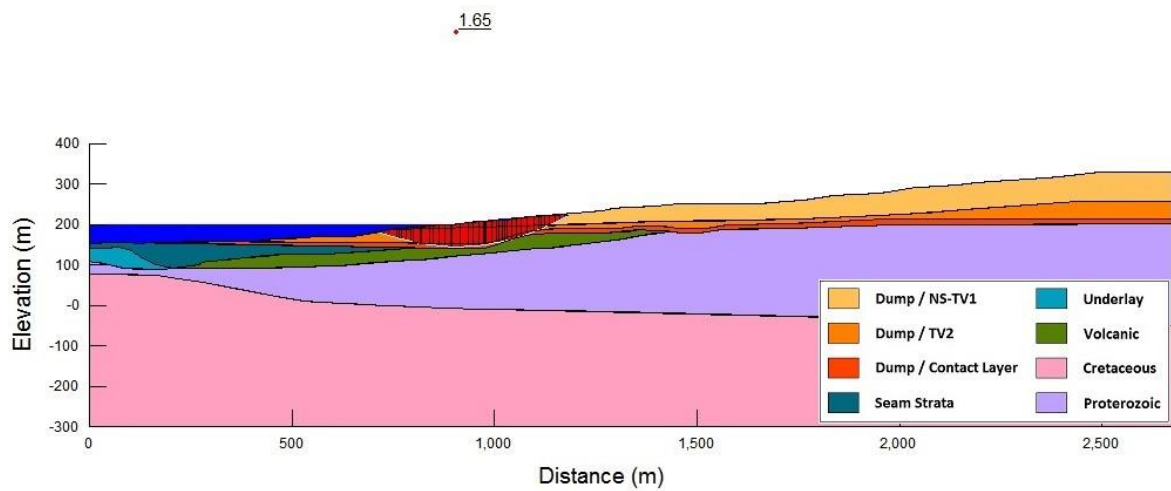
Στο πρόγραμμα SLOPE/W, η διαδικασία της επίλυσης ξεκινά με τον σχεδιασμό κανάβου με τα πιθανά κέντρα κυκλικών επιφανειών ολίσθησης (Slip Surfaces) και περιοχής με τις εφαπτόμενες σε αυτούς τους κύκλους. Για την δημιουργία του κανάβου κέντρων χρησιμοποιούνται οι εντολές Draw → Slip Surface → Grid, ενώ για τις εφαπτόμενες οι εντολές Draw → Slip Surface → Radius (Σχήμα 5.19).

Η επίλυση του μοντέλου πραγματοποιείται στο πεδίο «Solve Manager» με την εντολή «Start». Η διαδικασία της επίλυσης επαναλαμβάνεται πολλές φορές με διαφορετικά τα κέντρα ή / και εφαπτόμενες μέχρι να βρεθεί η θέση που αποδίδει τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety, FS).

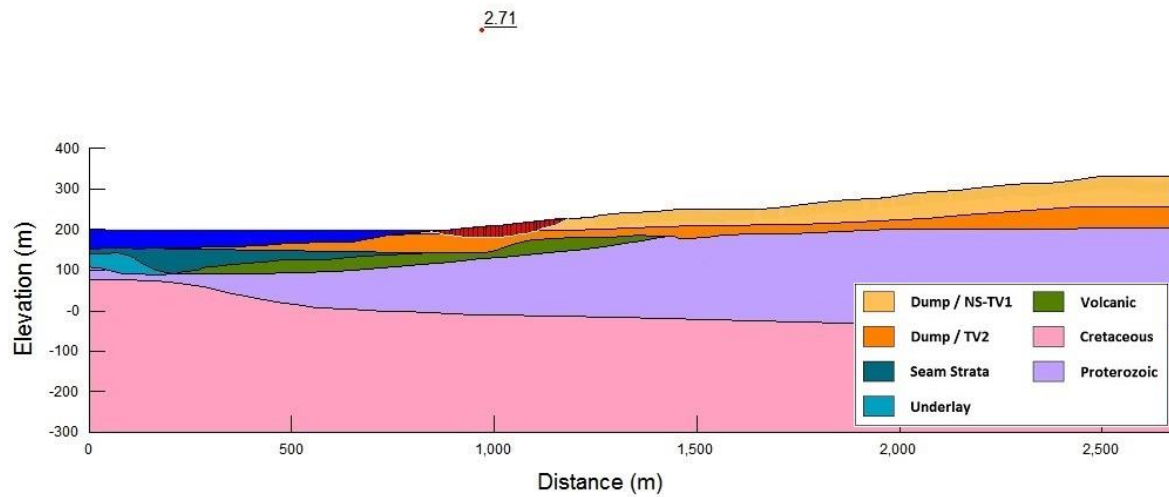
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν την πιο επισφαλή επιφάνεια ολίσθησης και τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας του πρσανούς και παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.20, 5.21, 5.22 και 5.23 και συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.5.



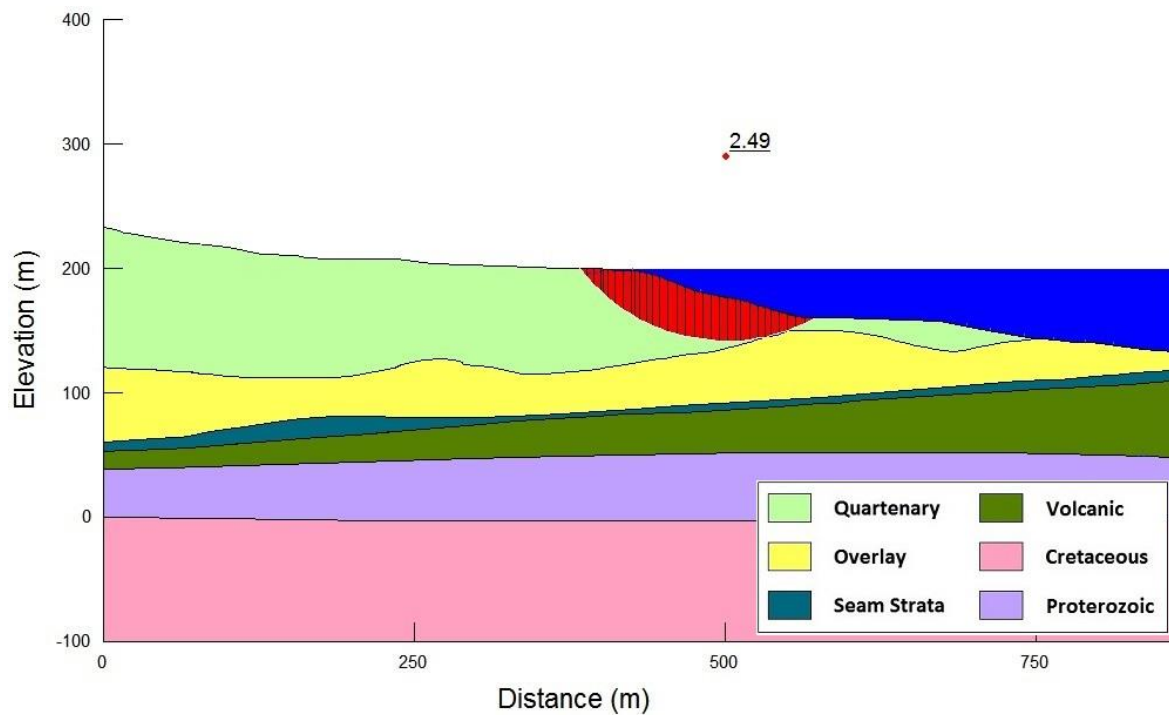
Σχήμα 5.18: Σχεδιασμός κέντρων και εφαπτόμενων σε πιθανές κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης στο SLOPE/W.



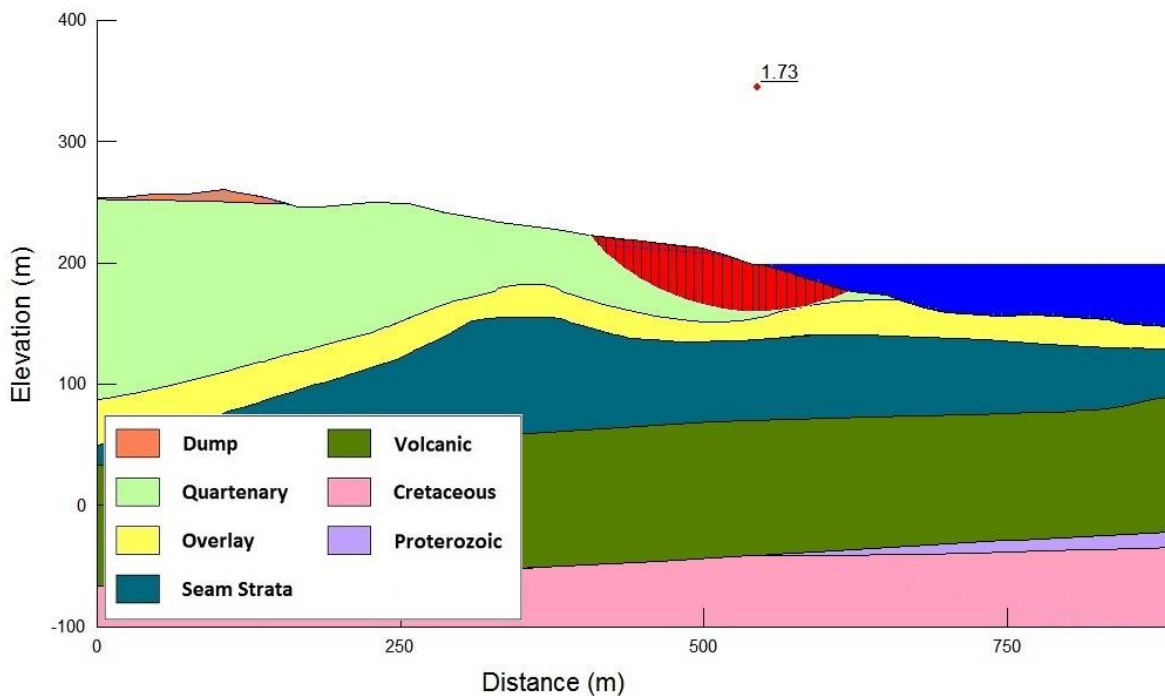
Σχήμα 5.19: SLOPE/W – Τομή Α με Contact Layer: Επιφάνεια ολίσθησης και συντελεστής ασφαλείας του πρανούς.



Σχήμα 5.20: SLOPE/W – Τομή Α χωρίς Contact Layer: Επιφάνεια ολίσθησης και συντελεστής ασφαλείας του πρανούς.



Σχήμα 5.21: SLOPE/W – Τομή Β: Επιφάνεια ολίσθησης και συντελεστής ασφαλείας του πρανούς.



Σχήμα 5.22: SLOPE/W – Τομή C: Επιφάνεια ολίσθησης και συντελεστής ασφαλείας του πρανούς.

Πίνακας 5.5: Συντελεστές ασφαλείας (FS) για όλα τα μοντέλα επίλυσης θεωρώντας σταθερές συνθήκες ροής.

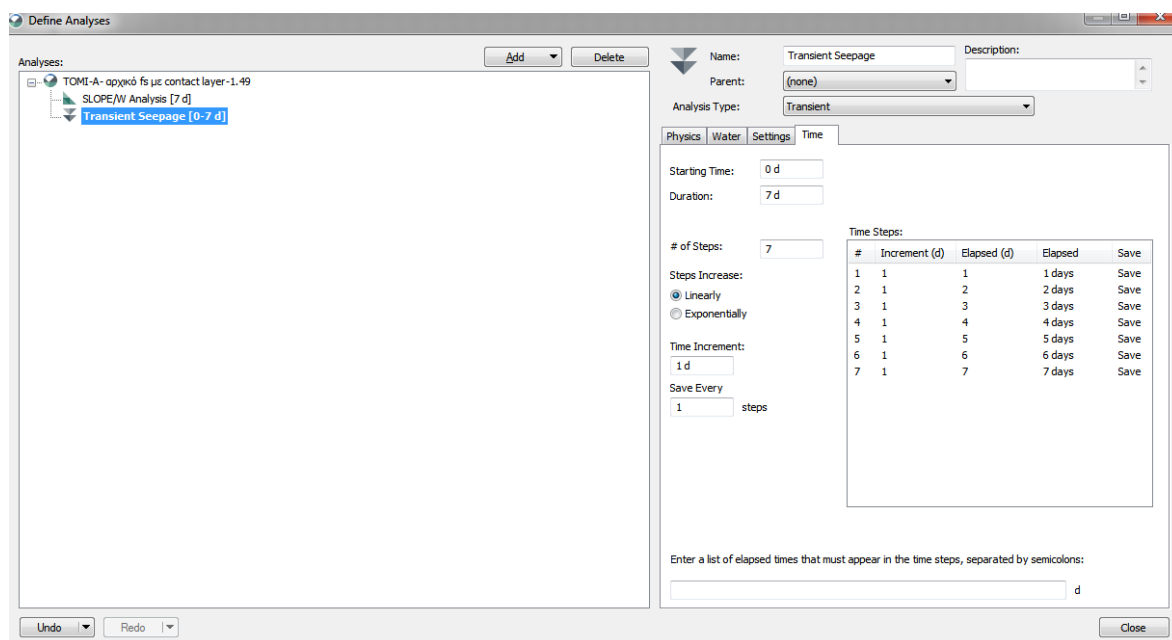
Μοντέλο	FS
Τομή A με Contact Layer	1.65
Τομή A χωρίς Contact Layer	2.71
Τομή B	2.49
Τομή C	1.73

Από τον Πίνακα 5.5 προκύπτει ότι όλα τα πρανή είναι ασφαλή κάτω από τις θεωρούμενες συνθήκες. Το πιο επισφαλές τμήμα είναι αυτό της τομής A (FS = 1.65) θεωρώντας την ύπαρξη του Contact Layer. Με βάση τη διαπίστωση αυτή, έγινε περαιτέρω ανάλυση του συγκεκριμένου πρανούς (τομή A) σε συνθήκες μεταβατικής ροής, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα (5.5).

5.5. Επίλυσεις μεταβατικής ροής και αποτελέσματα

Η ευστάθεια της τομής A, με ή χωρίς το «Contact Layer» διερευνήθηκε και σε συνθήκες μεταβατικής ροής. Οι συνθήκες ορίσθηκαν στο πρόγραμμα SEEP/W μέσω των εντολών Define → Analyses και την επιλογή μεταβατικού τύπου ροής (Transient).

Η μεταβατική ροή, αντίθετα από τη σταθερή, θεωρεί δυναμική εξέλιξη της ροής και προφανώς εξαρτάται από τον χρόνο. Η επίλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε σε χρόνο ίσο με 7 ημέρες (Starting Time = 0 d και Duration = 7 d) και ημερήσια βήματα (# of Steps = 7, Steps Increase: Linearly, Time Increment = 1 d, Save Every 1 step), παράμετροι οι οποίες ορίσθηκαν στο πεδίο «Time», όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.23.



Σχήμα 5.23: Επιλογή χρόνου και βημάτων ανάλυσης μεταβατικής ροής στο SEEP/W.

Από την επίλυση και τη χρήση των προγραμμάτων SEEP/W και SLOPE/W προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Συντελεστές ασφαλείας (FS) θεωρώντας μεταβατικές συνθήκες ροής στην τομή Α.

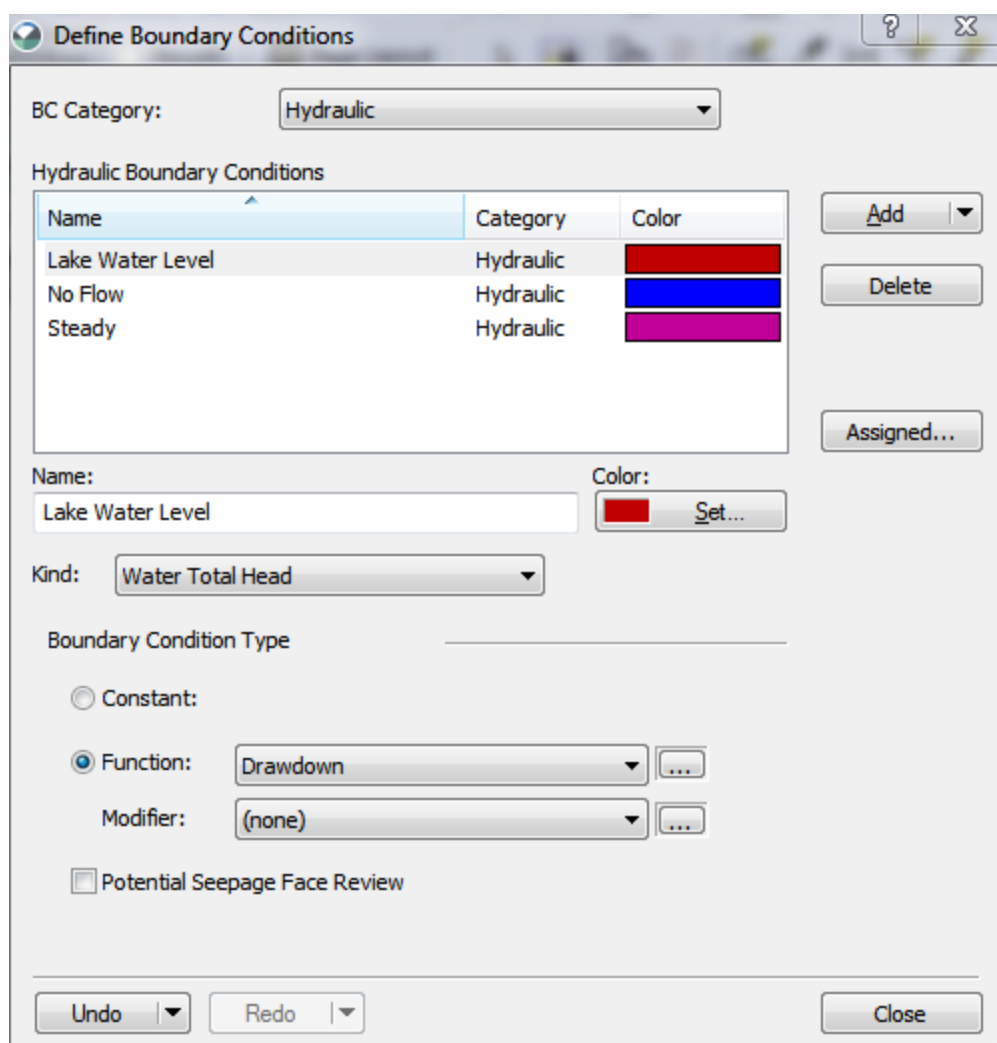
Μοντέλο	FS
Τομή Α με Contact Layer	1.49
Τομή Α χωρίς Contact Layer	2.63

Σημειώνεται ότι σε όλες τις επιλύσεις μεταβατικής ροής, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που εφαρμόστηκαν στις επιλύσεις σταθερής ροής. Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας (FS) μόνο του τελευταίου βήματος επίλυσης, καθώς αυτοί είναι και οι μικρότεροι.

Παρατηρείται αναμενόμενη μείωση του συντελεστή ασφαλείας (βλέπε Πίνακες 5.5 και 5.6), στο τελευταίο βήμα ανάλυσης (7^η ημέρα) χωρίς όμως το πρανές να καθίσταται επισφαλές. Σε κάθε περίπτωση πάντως, επιβεβαιώνεται η σημασία της ύπαρξης του Contact Layer, το οποίο επιδρά σημαντικά στην μείωση της ευστάθειας του πρανούς.

Στη συνέχεια, μελετήθηκαν 3 ακόμα σενάρια μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης για το μοντέλο της τομής Α θεωρώντας το Contact Layer. Η επιλογή αυτή δεν έγινε με αξιοσημείωτη μεταβολή του υδραυλικού φορτίου στα πλευρικά όρια του μοντέλου (δεξιό άκρο της τομής Α), λόγω μεγάλης απόστασης από τη λίμνη (βλέπε Σχήμα 5.2). Αυτό σημαίνει ότι σε όλες τις αναλύσεις, οι οριακές συνθήκες που αναφέρονται στην ενότητα 5.2.4 παρέμειναν σταθερές.

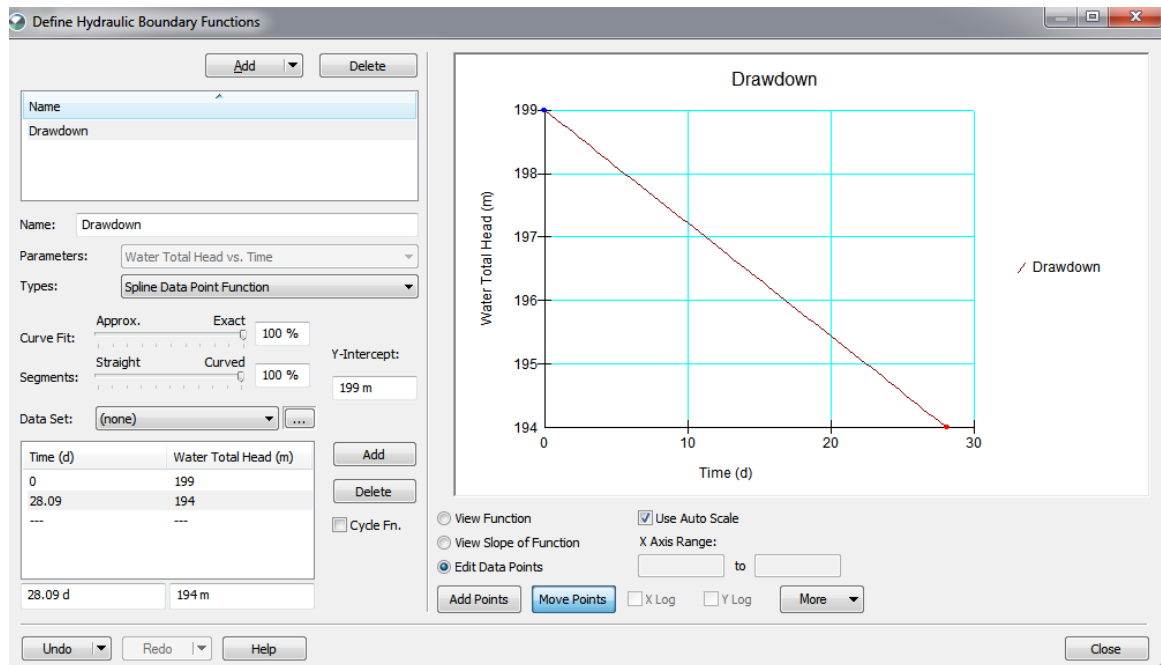
Η μεταβολή της στάθμης του νερού της λίμνης (Lake Water Level) ορίζεται στο SEEP/W χρησιμοποιώντας τις εντολές Draw → Boundary Conditions → Define. Στο πεδίο «Boundary Condition Type» επιλέγεται συνάρτηση («Function», βλέπε Σχήμα 5.24), η οποία μπορεί εύκολα να δημιουργηθεί εισάγοντας ζεύγη τιμών χρόνου και στάθμης της λίμνης.



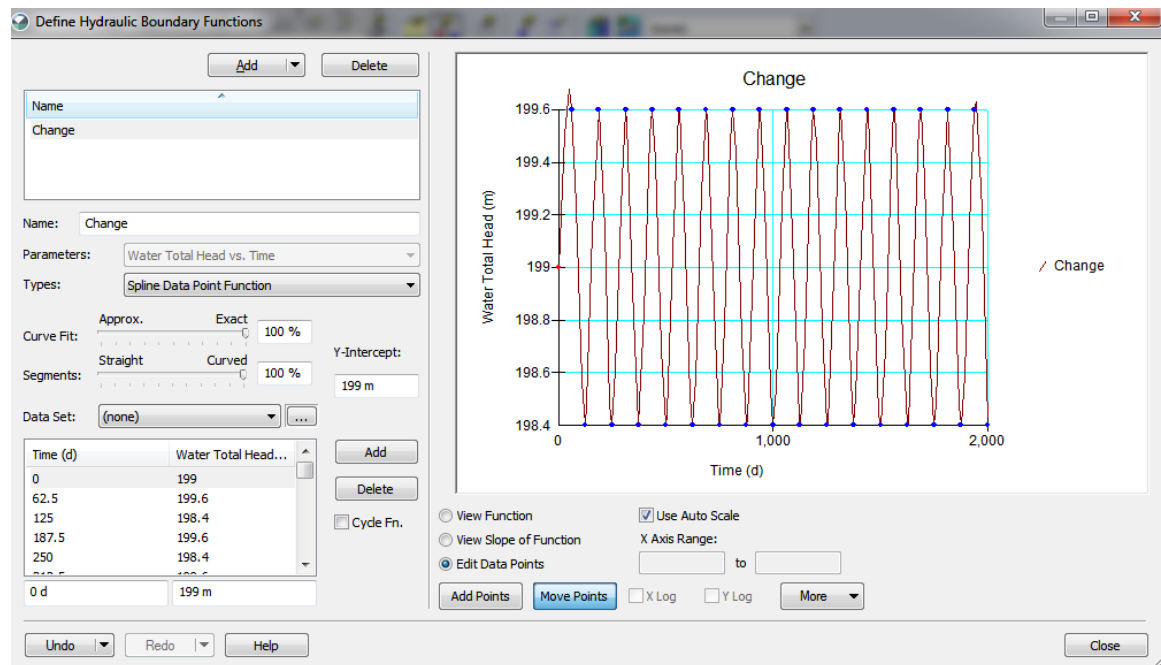
Σχήμα 5.24: Ορισμός μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης στο SEEP/W.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.25, στην περίπτωση της ταπείνωσης της στάθμης του νερού της λίμνης κατά 5 m με ρυθμό 0.178 m/d (Σενάριο 1α), τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα SEEP/W προκειμένου να δημιουργηθεί η (γραμμική) συνάρτηση ταπείνωσης της στάθμης, είναι: Time (d) = 0, Water Total Head (m) = 199 και Time (d) = 28.09, Water Total Head (m) = 194.

Επίσης, όσον αφορά στο 3^ο σενάριο αυξομείωσης της στάθμης του νερού της λίμνης, η συνάρτηση είναι ημιτονοειδής και ο συνολικός χρόνος είναι 2000 ημέρες. Παράδειγμα τέτοιας συνάρτησης φαίνεται στο Σχήμα 5.26, για 32 διακυμάνσεις (Σενάριο 3β).



Σχήμα 5.25: Δημιουργία συνάρτησης ταπείνωσης της στάθμης του νερού της λίμνης στο SEEP/W (Σενάριο 1α: Ταπείνωση 5 m με ρυθμό 0.178 cm/d).



Σχήμα 5.26: Δημιουργία συνάρτησης αυξομείωσης της στάθμης του νερού της λίμνης στο SEEP/W (Σενάριο 3β: Αυξομείωση 60 cm με ρυθμό 0.03 m/d και 32 διακυμάνσεις).

Σημειώνεται ότι όλα τα σενάρια μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης επιλύθηκαν σε χρόνο (*Duration*) ίσο αυτόν που δίνεται στον Πίνακα 5.1 και ημερήσια βήματα (ορισμός παραμέτρων με τις εντολές *Define* → *Analyses* → *Time* στο SEEP/W, όμοια με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας).

Από την επίλυση των παραπάνω μοντέλων (προγράμματα SEEP/W και SLOPE/W) προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Συντελεστές ασφαλείας (FS) για τα μοντέλα μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης της τομής Α με *Contact Layer*.

Σενάριο	Περίπτωση	FS
1. Ταπείνωση κατά 5 m	α. Ρυθμός: 0.178 m/d	1.31
	β. Ρυθμός: 0.03 m/d	1.47
	γ. Ρυθμός: 0.008 m/d	1.65
2. Ταπείνωση κατά 10 m	α. Ρυθμός: 0.178 m/d	1.40
	β. Ρυθμός: 0.03 m/d	1.55
	γ. Ρυθμός: 0.008 m/d	1.68
3. Αυξομείωση ± 60 cm με ρυθμό 0.03 m/d	α. Διακυμάνσεις: 2	1.29
	β. Διακυμάνσεις: 32	1.30
	γ. Διακυμάνσεις: 128	1.30

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.7, παρατηρούνται τα εξής:

- Η ασφάλεια του πρανούς μειώνεται όσο αυξάνει ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης του νερού της λίμνης (Σενάρια 1 και 2).
- Οι συντελεστές ασφαλείας του πρανούς σε πολύ μικρούς ρυθμούς ταπείνωσης της στάθμης του νερού της λίμνης προσεγγίζουν αυτούς της σταθερής ροής (Σενάρια 1γ, 2γ και Πίνακας 5.5).

- Η ταπείνωση της στάθμης του νερού της λίμνης κατά 5 m (Σενάριο 1) δίνει μικρότερους συντελεστές ασφαλείας από την ταπείνωση κατά 10 m (Σενάριο 2). Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε μικρές διαφοροποιήσεις της επιφάνειας ολίσθησης.
- Η αυξομείωση της στάθμης του νερού της λίμνης (Σενάριο 3) μειώνει δραματικά τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς.
- Η ευστάθεια του πρανούς δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την συχνότητα αυξομείωσης της στάθμης του νερού της λίμνης (Σενάριο 3).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών της λίμνης διαδραματίζει τόσο η περατότητα των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων όσο και η μεταβολή της στάθμης του νερού της λίμνης.

Κατά την πτώση της στάθμης του νερού της λίμνης, η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας οφείλεται κυρίως στη μείωση του φορτίου στήριξης του πρανού από το νερό της λίμνης και την μύζηση (εύρος ακόρεστης ζώνης).

Από την προσομοίωση με την χρήση του λογισμικού GeoStudio 2019 R2 (προγράμματα SEEP/W και SLOPE/W) της GEOSLOPE International Ltd για την ανάλυση της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης Most, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα πρανή της λίμνης είναι σταθερά. Ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας (FS) που εκτιμήθηκε ισούται με 1.49 και αφορά τη θέση της τομής Α σε συνθήκες μεταβατικής ροής λαμβάνοντας υπόψη το Contact Layer.
- Η ταπείνωση της στάθμης του νερού της λίμνης προκαλεί (αναμενόμενη) μείωση του συντελεστή ασφαλείας στα πρανή. Καθοριστικό ρόλο στην μείωση αυτή παίζει ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός αυτός, τόσο μικρότερη η ευστάθεια των πρανών.
- Η αυξομείωση της στάθμης του νερού της λίμνης προκαλεί επίσης μείωση της ευστάθειας των πρανών. Εν τούτοις ο συντελεστής ασφάλειας δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των διακυμάνσεων της στάθμης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Κούκης, Γ.Χ. και Σαμπατακάκης, Ν.Σ. (2007) Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Σούλιος, Γ. (1986) Γενική Υδρογεωλογία. Τόμος Α, University Press, Θεσσαλονίκη.
- Στειακάκης, Ε.Κ. (2008) Τεχνική Γεωλογία – Εδαφομηχανική. Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Συλλιγνάκης, Γ. (2022) Ευστάθεια πρανών επιφανειακών εκμεταλλεύσεων στο στάδιο της αποκατάστασης (πλήρωση της εκσκαφής με νερό). Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς
- Γάκης, Α.Δ. (2011) Διερεύνηση της υπολογιστικής προσέγγισης των εδαφικών κατολισθήσεων. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Bishop, A.W. & Blight, A.K.G. (1963) Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils. *Géotechnique*, 13: 177-197.
- Castro, J.M. and Moore, J.N. (2000) Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. *Environmental Geology*, vol. 39 (11), p. 1254-1260. ISSN 0943-0105.
- Fredlund, M.D. (2016) Numerical Modeling of Unsaturated Soils Problems, *Soils and Rocks*, São Paulo, 39(1): 97-109.
- Galavi, V. (2010) Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D. Internal Report. Plaxis BV.

- GEO-SLOPE International Ltd. (2015) Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2015) Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology.
- Johanson, J.M. and Edeskar, T. (2014) Effects of External Water-Level Fluctuations on Slope Stability, EJGE, Vol.19, 2437-2457.
- Josifoski, J. and Lenart, S. (2016) Some experience in numerical modelling of unsaturated slope instabilities. 3rd European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, pp. 1-6. DOI: 10.1051/ 08005.
- Lopez -Acosta, N.P., de la Fuente, H.A. and Auvinet, G. (2013) Safety of a protection levee under rapid drawdown conditions. Coupled analysis of transient seepage and 133 stability. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, pp. 3305 – 3308.
- RAFF (2022) Risk Assessment of Final Pits During Flooding. Research project co-financed by the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under the Grant Agreement No-847299-RAFF. Deliverable 1.1.1 (Analysis of archival data and previous design reservoirs). Authors: Burda, J., Zizka, L., Svoboda, P., Bajcar, A., Piróg, K., Rogosz, B., Resak, M., Dębicka, K., Firlit, G., Szczepiński, J., Maliszewski, M., Bukowski, P., Bukowska, M., Niedbalska, K., Augustyniak, I., Kura, K., Wadas, M., Gawryś, J., Lazar, M., Predoiu, I., Faur, F. and Apostu, I.
- Research Fund for Coal and Steel (RFCS) (2020) RAFF (Risk Assessment of Final pits during Flooding): Deliverable 1.1.1 – Analysis of archival data and previous design reservoirs.
- Research Fund for Coal and Steel (RFCS) (2021) RAFF (Risk Assessment of Final pits during Flooding): Deliverable 3.1.1 – Report on evaluation of hydrogeological conditions in the test sites.

- Song, E.X. (1990) Elasto-plastic consolidation under steady state and cyclic loads. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Duncan, S.G. and Wright, S.G. (1980) The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. Engineering Geology, 16, 5-17.